

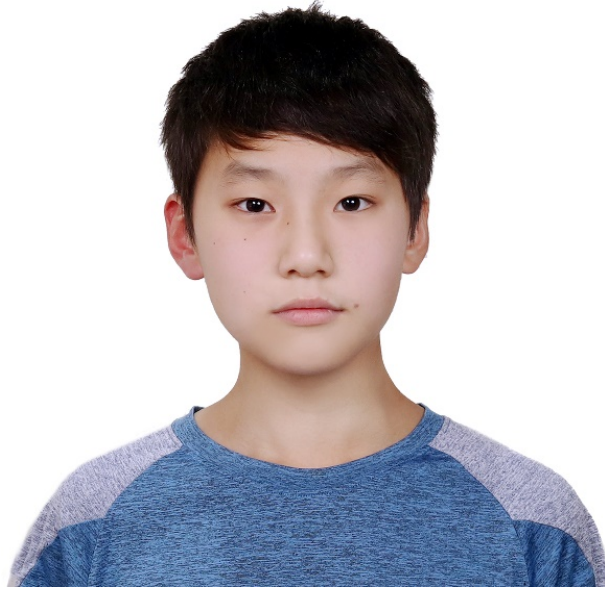
2024年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號	030028
參展科別	化學
作品名稱	可同時用於霧水收集與風力發電的石墨烯仿生 陣列魔毯
得獎獎項	四等獎

就讀學校	六和學校財團法人桃園市六和高級中等學校
指導教師	何雅琪、洪維松
作者姓名	洪雋祐

關鍵詞 自極化壓電材料、石墨烯、仿生水收集陣列

作者簡介



大家好，我是洪雋祐。

我是一位就讀國中二年級的雙殊生，是同時兼具身心障礙自閉類別與數理資優身分的特殊生。

從小我對科學知識就非常感興趣，常常利用手邊的材料做各種研究與發明，例如紙做的動力小船、電磁動力車改成太陽能小車、植物自動灌溉裝置等。

雖然我表達能力不及一般生，但是我豐富的科學知識與強烈的求知慾望，都遠遠超越我能表述的程度，希望我將來能成為科學研究者，為世界帶來更多幸福！

研究報告

作品名稱: 可同時用於霧水收集與風力發電的石墨烯仿生陣列魔毯

Graphene-based biomimetic array Magic carpet for simultaneous fog water harvesting and wind power generation

一、中英文作品摘要：

受到地區限制，偏遠地區一直面臨著缺水和缺電的問題。有許多解決方案，其中一個被視為在乾燥地區收集水的有效方法是薄膜霧氣收集技術。這項研究受到自然界沙漠甲蟲的啟發。我們在不吸水的石墨烯/PVDF基底上使用仿生的幾丁聚醣陣列，幫助水滴在霧氣中凝結和滾動脫落，使水收集效率達到0.63 LMH。此外，我們使用石墨烯和離子液體一起誘導PVDF晶型自組裝成具壓電性的 β 相，獲得最適化薄膜的電壓輸出可達到13V(\pm 6.5V)。我們還對於薄膜進行同時取水和取電的可行性評估，結果顯示，在4 m/s的霧氣風速下，水收集效率為0.74 LMH，發電功率為99.2 mW/m²。基於上述研究結果，我們證實了使用單一薄膜利用霧和風作為驅動力，可實現同時產生水和電，這對解決偏遠地區的缺水與缺電問題提供了新的解決方案。

Due to geographical restrictions, water and electricity shortages have always been crucial problems in remote areas. Among the numerous potential solutions, the fog harvesting technique using a film has been recognized as one of the effective methods for water collection in dry regions. In this study, researchers drew inspiration from desert beetles in nature to fabricate a biomimetic chitosan hydrophilic array coated on a hydrophobic PVDF/graphene (PG) film that is capable of efficient fog water harvesting,

reaching an efficiency of up to 0.63 LMH. Graphene and an ionic liquid (IL) were used to synergistically induce the self-assembly of PVDF crystalline phases into a piezoelectric β -phase, and the resulting optimized PG/IL_{1.5 wt%} film could have a voltage output of up to 13 V (± 6.5 V). Upon conducting an integrated assessment of water and electricity extraction from the film, and the results indicated a water collection efficiency of 0.74 LMH and a power generation of 99.2 mW/m² at a fog wind speed of 4 m/s. Based on the aforementioned research findings, we have demonstrated that a single film utilizing fog and wind as driving forces can achieve simultaneous water and electricity production. This provides a new solution for addressing the water and electricity scarcity in remote areas.

二、內文：

(一)、前言（含研究動機、目的、文獻回顧）

近年來，因為人口增加快速和技術進步，造成土地變成沙漠，全球的水和能源都變得非常短缺[1]。但是，由於它們互相依賴，單獨解決這兩個問題變得有挑戰性，所以我們需要開發一個綜合的解決方法[2]、[3]、[4]。海水雖然是地球上最豐富的水源，但因為鹽含量高，不能直接喝。所以近年來發展了很多種海水淡化技術，像是多效蒸餾 [5]、[6]、多級閃蒸 [7]、[8]、正向滲透 [9]、[10]、逆滲透 [11]、[12]、膜蒸餾 [13]、[14]和電滲析[15]、[16]來變成淡水。但對於偏遠或山區地區來說，地理限制會讓這些方法難以應用[17]。相較之下，霧中的水蒸氣提供了另一種淡水來源[18]。它能環保、高效、安全地收集水，不用擔心海上的限制，也不用做複雜的淨化和消毒過程。傳統的霧收集器是由放置在霧流方向垂直的聚合物網組成，讓水滴可以聚集起來儲存[19]、[20]。但材料的潮濕度只有一種會讓

水不容易積聚和流動，使得收集效率比較差。為了解決這個問題，研究人員探討了模仿生物的結構設計[21]、[22]、[23]、[24]、[25]、化學處理[26]、[27]、特別的水道設計[28]和列印技術[29]，讓霧收集器同時具有喜水和不喜水的特性，進而顯著提高收集效率。另一個挑戰是偏遠地區沒有足夠的能源，所以阻礙了這些地方的發展[30]、[31]。為了解決這個問題，近期的研究提出了將大氣中的水收集和各種發電技術結合的方法，這可以同時提供水和發電給偏遠地區。

基於上述背景，我們整理了摩擦電法、熱電法、動電法、水伏效應法、電化學法等與大氣水收集和發電相關的最新發展和例子，並總結了它們各自的原理。我們介紹了以下內容：1.摩擦電：將有潮濕表面的收集器和基於摩擦的電組件結合，同時產生淡水和電能[32]、[33]。2.熱電：利用溫差和塞貝克效應來發電[34]、[35]。3.電動：利用毛細現象在微通道內促進水分子流動，通過梯度差產生電[36]。4.水伏效應：利用液體和固體表面上的雙電層運動從水中發電[37]、[38]。5.電化學：利用特殊的薄膜透過氫還原電化學機制捕獲水並發電[39]。這些方法將材料的潮濕特性和發電機制結合在一起，同時達到產水和發電的效果。但這些方法會消耗額外的能量，例如水的冷凝或解吸。在各種自然能源中，風力發電有很多優點，像是豐富、普遍、無污染和再生等。發電可以利用風或壓力的變化來達成[40]。霧和風能的應用為水和能源的開發提供了新的可能性。

我們的研究靈感來自於自然界中發現的沙漠甲蟲[41]。我們將一些不同親水性材料，例如殼聚糖（CS）、聚乙烯醇（PVA）、海藻酸鈉（SA）以及疏水陣列

聚二甲基矽氧烷 (PDMS)，塗在疏水性的PVDF/石墨烯 (PG) 薄膜上。除此之外，我們還使用了石墨烯和離子液體來協同誘導PVDF自組裝成壓電 β 相。根據我們研究的結果，同時收集霧氣和發電薄膜的機制如圖1a所示。在收集霧氣的部分，我們選用了最密集的網格陣列塗層，並選擇了具有最高水接觸角和最低滑動角的最佳化親水材料。這樣的薄膜可以實現水滴的最佳冷凝和滾動收集 (圖1b)。在風力發電的部分，通過在PVDF中添加優化的石墨烯和離子液體，我們可以將霧流中的風能轉換為電能，從而實現風力發電效率的最大化 (圖1c)。我們的研究為偏遠地區利用自然資源獲取水和能源提供了新的方法和可行性。

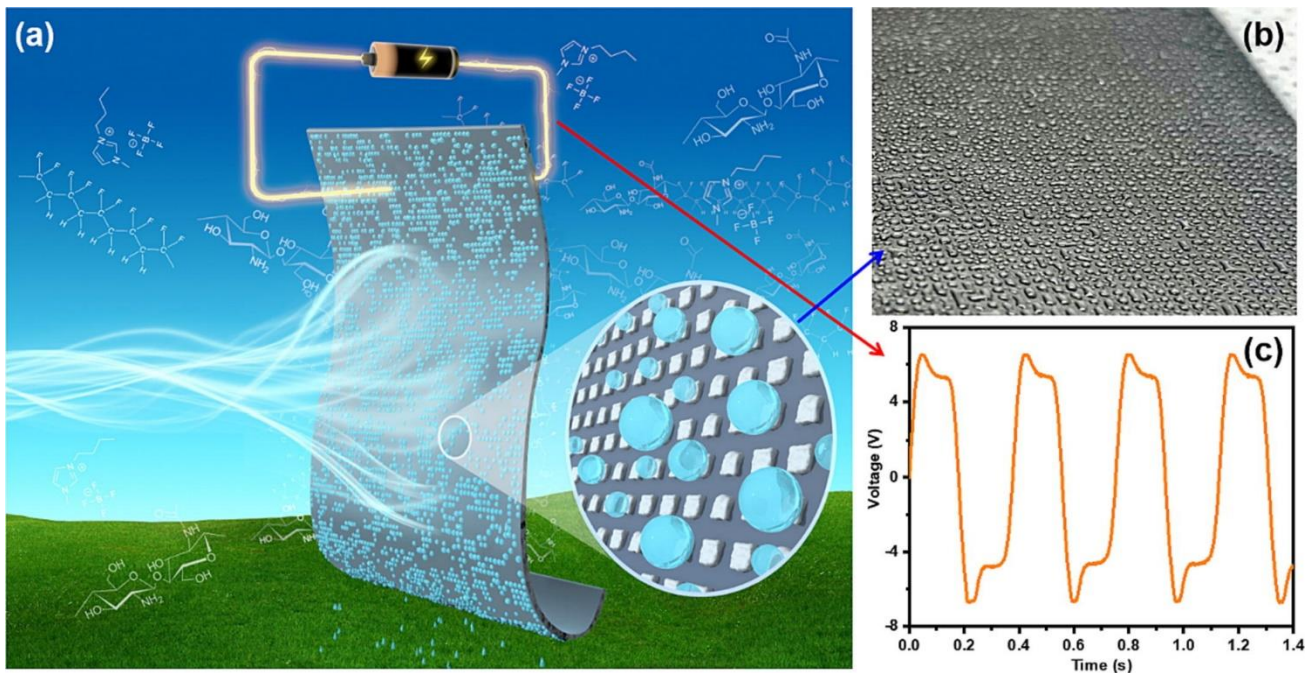


圖1. 用於同時集霧和風力發電的薄膜：(a) 示意圖；(b) 水滴捕獲能力和 (c) 最佳薄膜的壓電響應。

(二)、研究方法或過程

2.1. 材料

在整個實驗中所用的材料都是高純度化學品。Kynar® HSV900 PVDF粉末是從Arkema (法國科隆布) 購買的, 而N002-PDR石墨烯粉末是從Angstrom Materials (美國俄亥俄州) 購買的。1-甲基-2-吡咯烷酮 (NMP)、BMIMBF₄、殼聚糖、聚乙烯醇 (PVA, Mw89000-98000)、海藻酸鈉和戊二醛是從Sigma-Aldrich (美國密蘇裡州) 購買的。乙酸是從Honeywell(德國)購買的, 聚二甲基矽氧烷(PDMS) 是從DOWSIL (美國加州) 購買的。

2.2. 石墨烯仿生陣列薄膜的製造過程

PG/IL x wt% (PVDF/石墨烯/IL x wt%) 薄膜是使用蒸汽誘導相分離 (VIPS) 方法製備的。這裡的"x"代表添加的BMIMBF₄離子液體的比例。首先將PVDF粉末加入0.5-1.5 wt% BMIMBF₄離子液體溶液中的NMP中, 然後在攪拌80°C下持續攪拌24小時, 得到10 wt% PVDF/IL x wt% 混合溶液。接著將0.3比例的石墨烯添加到溶液中, 並使用均質器在5°C的冰浴中以5600 rpm均質化一小時。然後使用超音波浴將溶液脫氣一小時以去除氣泡。最後, 使用鑄刀製備600µm厚的薄膜, 並將其放入90°C的烘箱中除去殘留溶劑, 形成PG/IL x wt% 薄膜。同樣的製程也用於製備純PVDF薄膜和PG薄膜。

2.3. 親水/疏水性聚合物溶液及薄膜表面的製備

2.3.1. CS溶液製備

將殼聚糖粉末加入乙酸和去離子水中，製成3 wt%的CS溶液。在50°C下加熱攪拌至完全溶解。最後，添加濃度為5wt%的戊二醛以進行交聯。

2.3.2 . PVA溶液配製

將一定量的PVA粉末溶解在去離子水中，並在80°C下加熱攪拌，製成20wt%的PVA溶液。最後，添加濃度為5wt%的戊二醛以進行交聯。

2.3.3 . SA溶液配製

為了製備SA溶液，將3wt%的海藻酸鈉粉末加入去離子水中。在50°C下加熱攪拌至完全溶解。最後，添加濃度為5wt%的戊二醛以進行交聯。

2.3.4 . PDMS溶液製備

將PDMS和有機矽彈性體交聯劑以10:1的比例混合。充分攪拌混合物以確保均勻。隨後，將混合物置於真空下以去除任何截留的氣泡，形成PDMS溶液。

2.3.5 . 親水性/疏水陣列塗層

利用網版印刷技術將上述四種親水性和疏水性聚合物塗覆在PG/IL 1.5 wt%薄膜的表面，形成網孔直徑為0.2mm和0.5mm、間距為0.5mm的親水性和疏水性陣列。然後將列印的薄膜在60°C的烤箱中加熱2小時，使陣列固化。

2.4 . PG/IL x wt% 薄膜的物理化學特性

使用一系列儀器來研究PVDF 1 -石墨烯0.3 /IL xwt%薄膜的性質。使用FE-SEM和EDS進行形態和元素組成分析。使用WCA測量膜的親水性/疏水性。使用XRD研究薄膜的結晶行為。使用拉伸試驗機測定膜的強度。用XPS觀察膜的元素組成和

鍵結情況。使用ATR-FTIR識別薄膜中的官能基。使用EIS評估膜在不同頻率下的阻抗變化。使用原子力顯微鏡分析每個薄膜的表面粗糙度。

2.5 . 石墨烯仿生陣列薄膜的壓電特性

使用5 cm × 8 cm大小的PG/IL x wt% 薄膜，上面有銅箔電極和導線。將電極連接到電荷放大器和電壓電流計。薄膜在頻率為2 Hz的往復式直線馬達作用下受到60秒的影響，並將薄膜產生的電壓信號通過NI採集卡連接到電腦記錄。

2.6 . 不同網格尺寸和親水/疏水陣列的PG/IL 1.5 wt% 薄膜的集霧性能

將尺寸為5 cm × 8 cm的PG/IL 1.5 wt% 薄膜，具有不同的親水-疏水陣列尺寸，一端固定在支撐架上，放入距離出霧口15cm的溫濕室中。透過重量感測器記錄薄膜表面凝結水的重量變化。

2.7 . 石墨烯仿生陣列薄膜的風能收集性能

將寬5cm、長8cm、10cm、12cm的PG/IL 1.5wt% 薄膜貼上電極並固定在支撐架上，並聯1MΩ負載電阻。使用風扇以不同速度產生風，並使用連接到電腦的NI採集卡記錄薄膜產生的電壓訊號。然後根據記錄的電壓訊號計算薄膜的輸出功率。

2.8 . PG/IL 1.5 wt% 薄膜原型

將具有0.2 mm親水性CS陣列的PG/IL 1.5 wt% 薄膜固定在支撐框架的一端，距離出霧口15cm，使用風扇提供氣流。實驗參數和測量方法與2.6 PG/IL的集霧性能、2.7 PG/IL的風能收集性能相同，並通過連接電路來驗證薄膜在此期間的儲能效率。

(三)、研究結果與討論

3.1. 石墨烯仿生陣列薄膜的外觀

薄膜的親水性/疏水性、表面形態和微觀結構是影響集霧器性能的關鍵因素。在這項研究中，我們製備了含有不同成分的PG/IL x wt%混合薄膜，具體呈現於圖2a - e。添加石墨烯導致原本透明的PVDF薄膜變成黑色，並隨著離子液體含量增加，薄膜呈現金屬光澤，同時保持柔韌性。透過掃描電子顯微鏡觀察圖2f-j，我們發現石墨烯的加入將PVDF的緻密表面轉變成堆疊的魚鱗狀結構。橫截面圖(圖2 k-o)顯示薄膜由原本緻密無孔的PVDF結構轉變為石墨烯引起的木腔狀介孔結構，並且在橫截面上均勻分布。此外，添加石墨烯後，薄膜厚度從最初的PVDF 28.5 μm 增加到 31.5 μm 。隨著離子液體含量增加至1.5 wt%，厚度進一步增加至40.1 μm 。這是因為石墨烯和PVDF之間充滿了離子液體，導致分子間的空隙擴大以及薄膜厚度增加[42]。這些結果顯示，薄膜表面形態的改變與其親水性/疏水性有關[43]、[44]，這可能會影響霧水收集性能。另一方面，由離子液體造成的橫截面結構可能會進一步提高薄膜的孔隙率，並影響其壓電性能[45]，[46]。

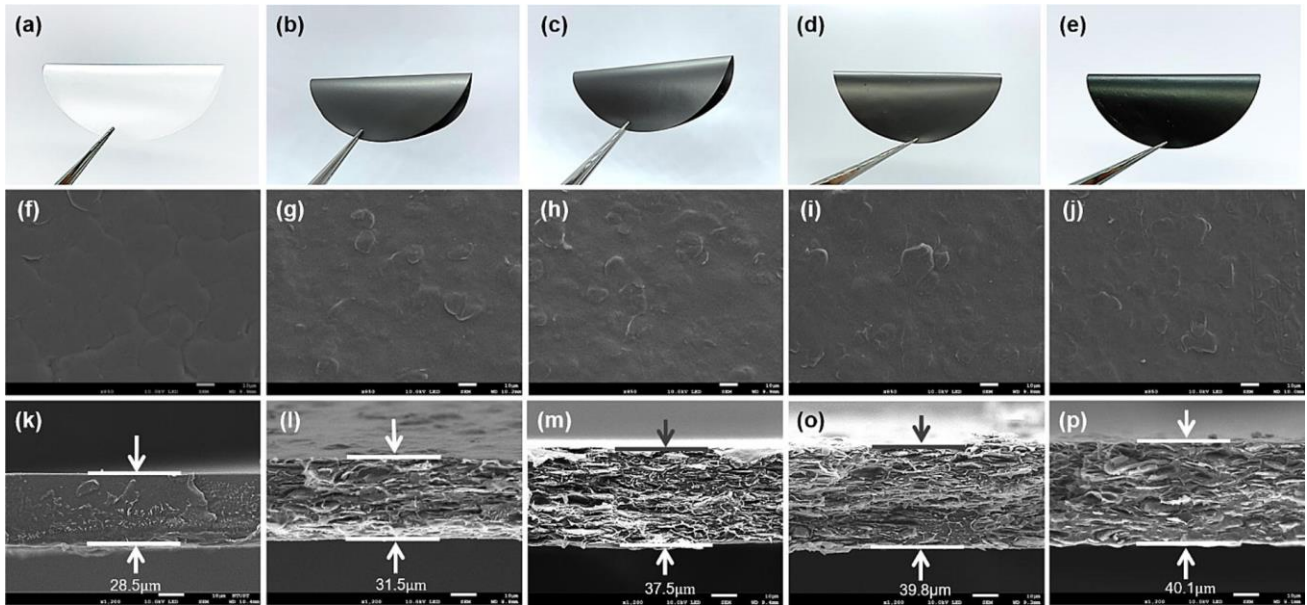


圖2展示了不同離子液含量石墨烯薄膜的照片和掃描電子顯微鏡（SEM）圖像，分別為(a)–(e)。不同列呈現了不同樣品條件：PVDF (a、f、k)；PG (b、g、l)；PG/IL 0.5 wt% (c、h、m)；PG/IL 1 wt% (d、i、o)；以及 PG/IL 1.5 wt% (e、j、p)。

3.2. 石墨烯仿生陣列薄膜的性質表徵

薄膜的表面特性和晶體結構會影響薄膜的霧收集能力和電能輸出。根據圖3a的數據，PVDF的水接觸角（WCA）為 76.4° 。當添加石墨烯並增加離子液體含量後，水接觸角增加至 81.5° ，最高可達 93.9° 。薄膜疏水性的增強是由於BMIMBF₄離子液體中氟原子的強烈負電荷，使得與氫碳鍵相比，具有更高的碳氟鍵能。在添加含氟離子液體的摻雜溶液時，薄膜的表面能降低，因此使得其具有更高的疏水性[47]。此外，從圖3b可以看出，隨著石墨烯添加量的增加，初始PVDF薄膜的表面粗糙度參數（Ra、Rq、Rz）分別增加至 $48.9\mu\text{m}$ 、 $62.6\mu\text{m}$ 和 $474\mu\text{m}$ 。當添加離子液體並增加其含量後，薄膜的粗糙度進一步增加至 $56.3\mu\text{m}$ 、 $72.7\mu\text{m}$ 和 $538\mu\text{m}$ 。

與傳統的親水表面不同，這種情況下的粗糙度增加對應於疏水性的提高。這是因為薄膜表面暴露的疏水性石墨烯主導了整體疏水性的增強[48]。

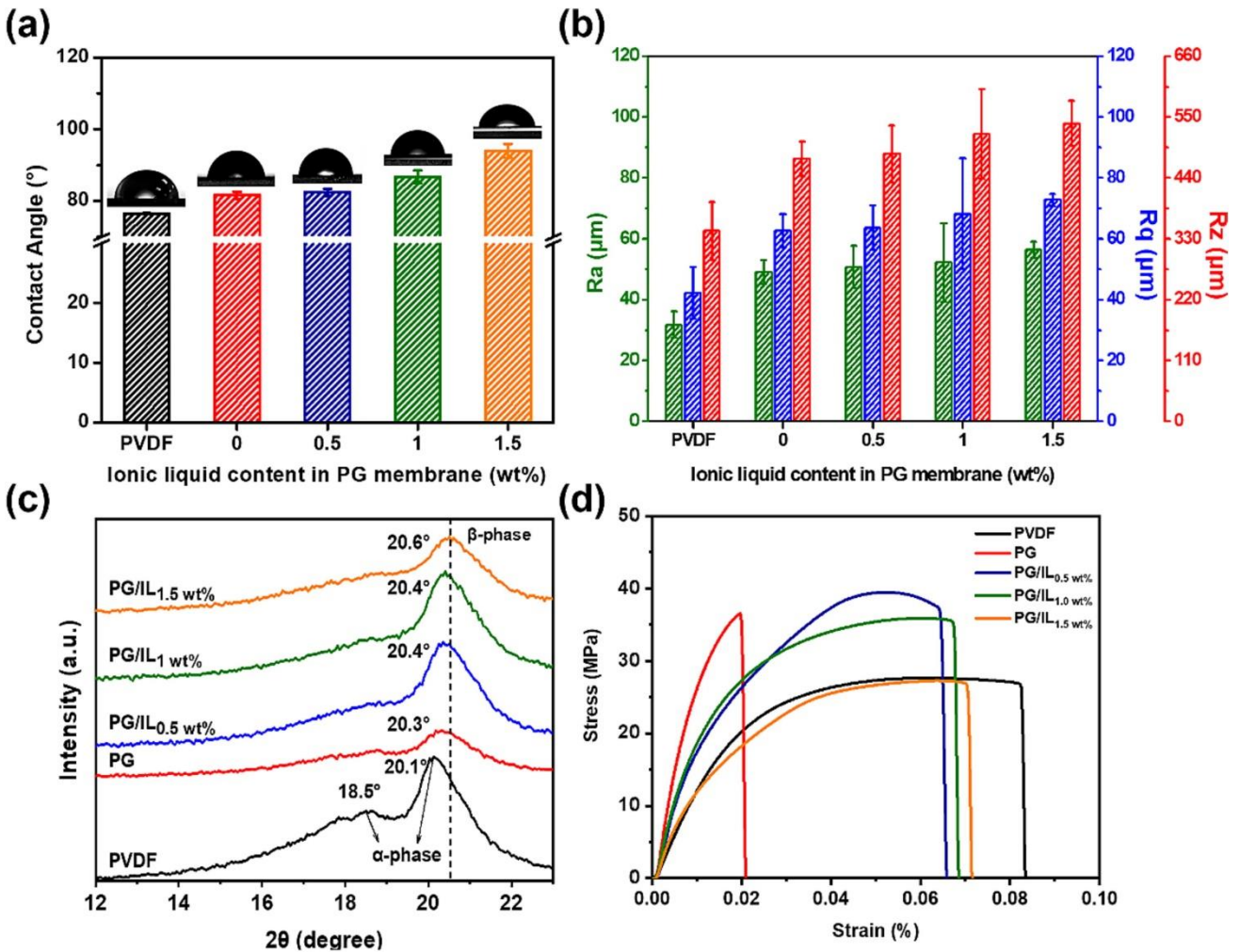


圖3. 石墨烯仿生陣列薄膜的物理特性：(a) 親水性；(b) 粗糙度；(c) 12°至23°範圍內的XRD圖譜；(d) 薄膜機械性測試。

薄膜的結晶特性會直接影響其壓電能力，這一點可以從圖3c中看出來。XRD的結果指出，PVDF薄膜在18.5°和20.1°處有兩個衍射峰，分別對應於α相的(0 2 0)和(1 1 0)晶面[49]。當添加了石墨烯的PG薄膜，在20.3°處發生了從α相到γ相的相變，對應於(1 1 0)/(1 0 1)晶面。這可能是因為石墨烯原子層和PVDF之間的靜電力導致了分子鏈的取向[50]。隨著離子液體的添加和含量的增加，γ相在20.6°

處進一步轉變為 β 相，對應於(1 1 0) / (2 0 0)晶面。這是因為1-丁基-3-甲基咪唑鎧四氟硼酸鹽(BMIMBF₄)離子液體中的BMIM⁺陽離子與石墨烯中離域 π 電子雲之間的相互作用，以及BF₄⁻與石墨烯中氫原子之間的吸引力。這些結果表明薄膜的結晶行為受到多種因素的影響，包括靜電力、庫倫相互作用和范德華力。另外，薄膜的機械性質也得到了研究，從圖3d中可以看出，添加石墨烯後，薄膜的剛性增加，但隨著離子液體用量的增加，剛性又下降，從而增強了薄膜的延展性。這是因為離子液體的添加起到了增塑作用。膜延展性的增加可能會導致風力發電期間薄膜的變形。我們提出了三種成分之間的協同作用機制，並將其應用於霧水收集和風力發電的複合薄膜。

3.3. 石墨烯仿生陣列薄膜的水吸收能力和表面特性

我們從自然界沙漠甲蟲的水吸收結構中得到啟發，使用絲網印刷在疏水膜上塗上了親水陣列（CS、PVA、SA）和疏水陣列（PDMS）。根據圖4中的SEM圖像顯示，網版印刷親水陣列後，CS陣列附著力最佳，覆蓋也最完整，而PVA則只有部分覆蓋，SA則有聚集現象。PDMS塗層後形成了擴散結構。圖4a-d則展示了EDX分析結果，顯示在PG/IL 1.5wt% 薄膜中碳和氟元素均勻分佈在表面上。圖4e-t則證實了親水和疏水性聚合物網印後表面氧和矽陣列的規則排列，證明仿生親水疏水陣列的成功製備。

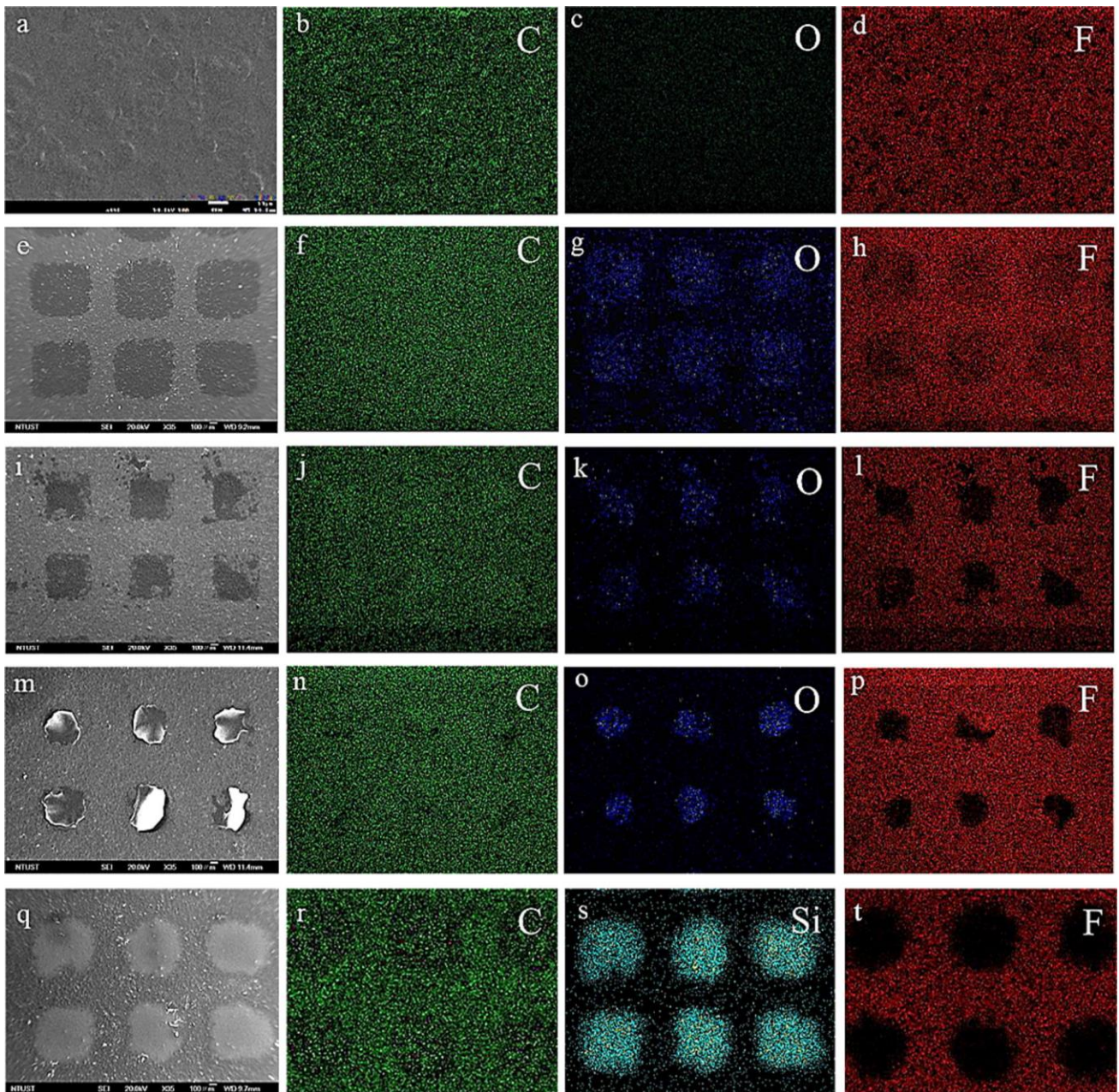


圖4、(a)-(d) 石墨烯仿生陣列薄膜、(e)-(h) CS、(i)-(l) PVA、(m)-(p) SA 的SEM 表面圖像和EDS元素圖。

為了更深入了解具有親水和疏水陣列的薄膜的霧收集行為，記錄了PG/IL 1.5 wt% 薄膜表面上的實際液滴凝結並如圖5所示。圖5c、f、i和l的結果表明，當親水聚合物完全塗覆時，由於凝結的霧立即在親水表面擴散成薄薄的水膜，因此無法有效地凝結水滴，使得凝結水層不易分離。如圖5a、b、d、e、g和h所示，當塗

覆不同的親水陣列結構時，它們的表面有利於形成有序的水滴，並且不同尺寸的陣列有助於水滴的生長。但是，如圖5 j、k 和 l所示，在薄膜表面塗覆疏水層和陣列後，會導致隨機液滴凝結。儘管在疏水表面觀察到液滴凝結，但實際的集水效率將在後續評估中進行評估。另外，根據圖5中觀察到的結果，可以注意到，所有膜上的水滴都會基於本研究中製備的陣列結構生長並合併，最終由於自然重力而脫落。

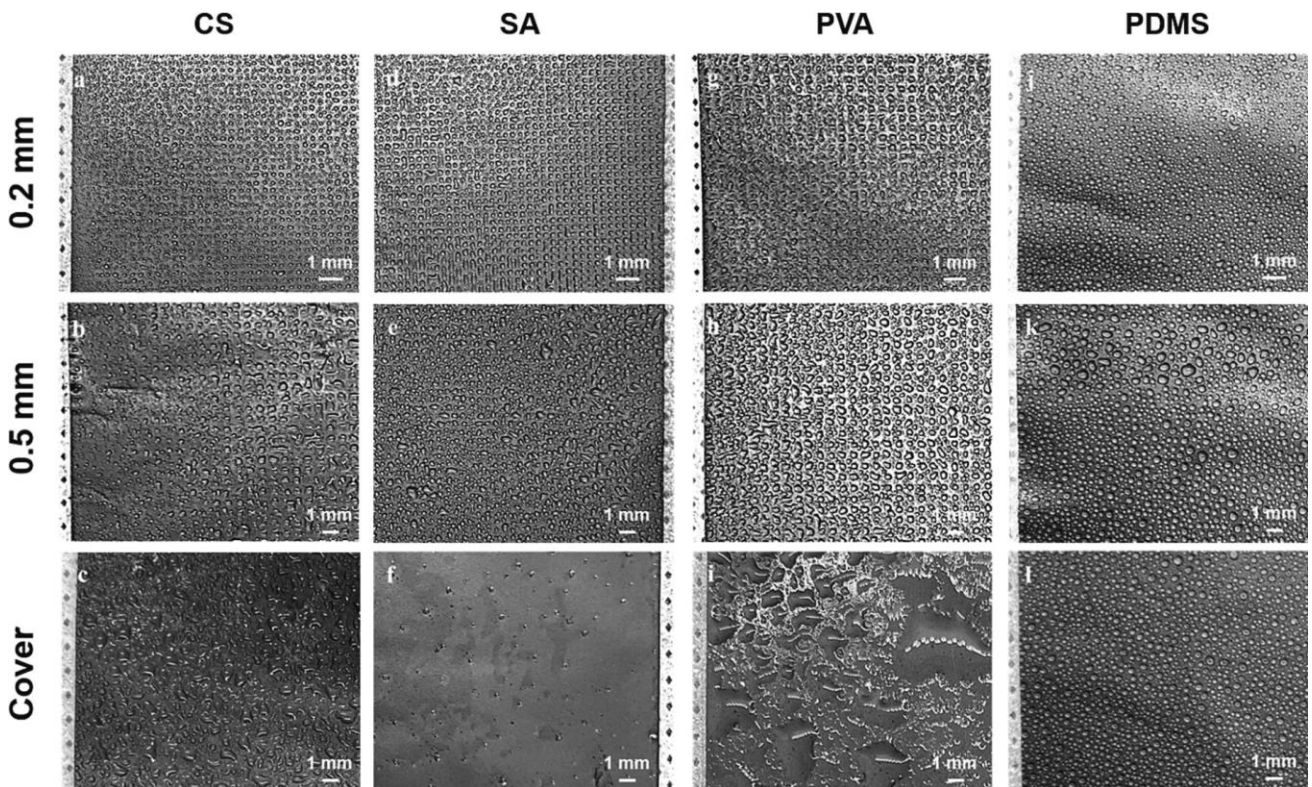


圖5、石墨烯仿生陣列薄膜上的水滴，具有 (a)-(c) CS、(d)-(f) SA、(g)-(i) PVA 和 (j)-(l) PDMS 陣列點尺寸為0.2 mm、0.5 mm，以及表面全覆蓋。

圖6顯示了評估薄膜的霧收集效率的測試結果。圖6a顯示了未放置薄膜時收集的水滴量，如黑色虛線所示。結果顯示，與親水性PVA和SA相比，CS膜在全覆蓋和不同陣列尺寸下均表現出最高的集水效率。對CS的進一步觀察表明，0.2

毫米的網孔尺寸表現出最佳的集水效率為 $0.63 \text{ Lm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (LMH)。圖6b -c中的水接觸角 (WCA) 和滾動角結果證實了這一點，其中0.2毫米CS陣列在其他親水聚合物中表現出最高的水接觸角 (91.3°) 和最低的滾動角 (56.4°)。這表明該薄膜具有優化的水滴冷凝和收集特性。另一方面，疏水性PDMS塗層在不同條件下表現出相似的集水效率。這歸因於觀察到液滴在疏水表面上凝結，但疏水表面不利於液滴黏附。總體而言，這些結果支持適當且緻密的親水陣列有助於霧收集期間水滴的凝結和解吸。

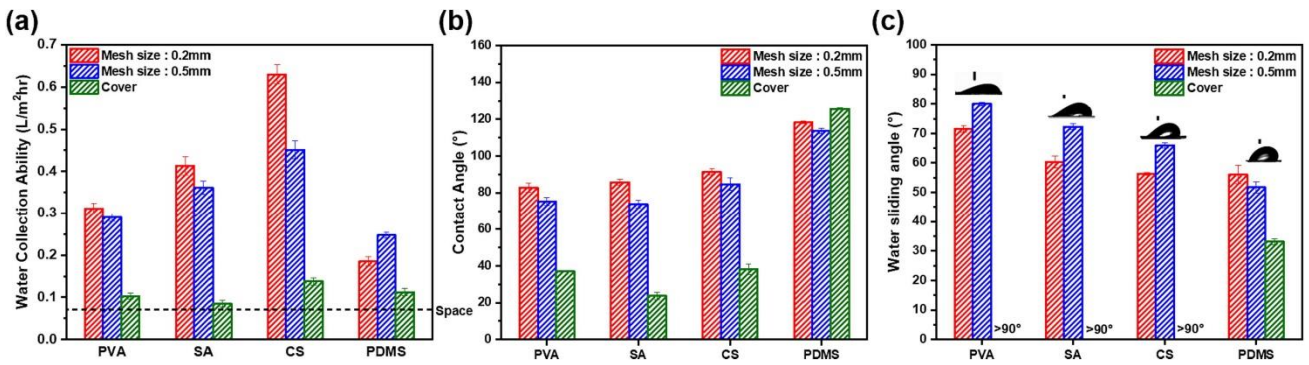


圖6、不同聚合物塗覆在陣列點尺寸為 0.2 mm、0.5 mm、表面全覆蓋的石墨烯仿生陣列薄膜之 (a) 水收集能力、(b) 水接觸角、(c) 滑動角。

3.4. 石墨烯仿生陣列薄膜的電性能和壓電性能

透過壓電效應發電是石墨烯仿生陣列薄膜有效性的另一個重要指標。透過電化學阻抗譜(EIS)和d₃₃測定分析薄膜的電學性能和壓電性能，如圖7所示。圖7a中的奈奎斯特圖顯示所有薄膜曲線均由半圓組成，對應於電阻和電容分量 (RC分量)。PG具有最大的半圓直徑，顯示在高頻區域存在顯著的電容環，這表明存在電荷轉移電阻。隨著離子液體含量的增加，半圓直徑減小，顯示電荷轉移電阻減

少。較小的半圓直徑與薄膜的較高電導率有關。透過並聯RC元件來模擬計算薄膜電阻和電容，如圖7b -c所示。PVDF是典型的絕緣體，電阻值接近無限大。透過添加石墨烯，PG薄膜的電阻降低至694Ω，透過添加優化的1.5wt%離子液體，薄膜電阻進一步降低至280Ω。這是由於石墨烯和離子液體的均勻堆疊和分散，導致較低的電阻。此外，沒有電容特性的PVDF薄膜在添加石墨烯和最佳化的離子液體後，電容值分別增加了0.086 nF和0.219 nF。電容結構的形成是因為作為介電材料的絕緣PVDF被插入到作為兩個平行電極的石墨烯和離子液體之間的空間。微觀結構的產生是三種成分之間協同作用的結果。電阻的降低和電容的增加將有助於 PG/IL x wt%薄膜的壓電性能。d₃₃值是決定材料壓電性能的重要參數，如圖7d所示，非偏振PVDF的d₃₃值接近0pC/N。在膜中添加石墨烯後，d₃₃值增加至1.5pC/N。透過添加優化後的1.5 wt%離子液體，薄膜的d₃₃值可進一步提高至2.5 pC/N。圖7 e-f進一步研究了自組裝PG/IL的實際壓電響應x wt%使用線性往復試驗機對薄膜進行測試。結果表明，α相結晶PVDF幾乎沒有表現出壓電輸出。然而，添加石墨烯後，所得薄膜的輸出電壓為0.9V (±0.45V)。觀察到添加優化的 1.5 wt% 離子液體可將輸出電壓顯著提高至 13 V (±6.5 V)。此結果與d₃₃測量和XRD結果一致，顯示石墨烯和離子液體的協同作用誘導了PVDF的α相向電活性β相的聚合物排列。薄膜的壓電特性有助於提高電荷收集效率。

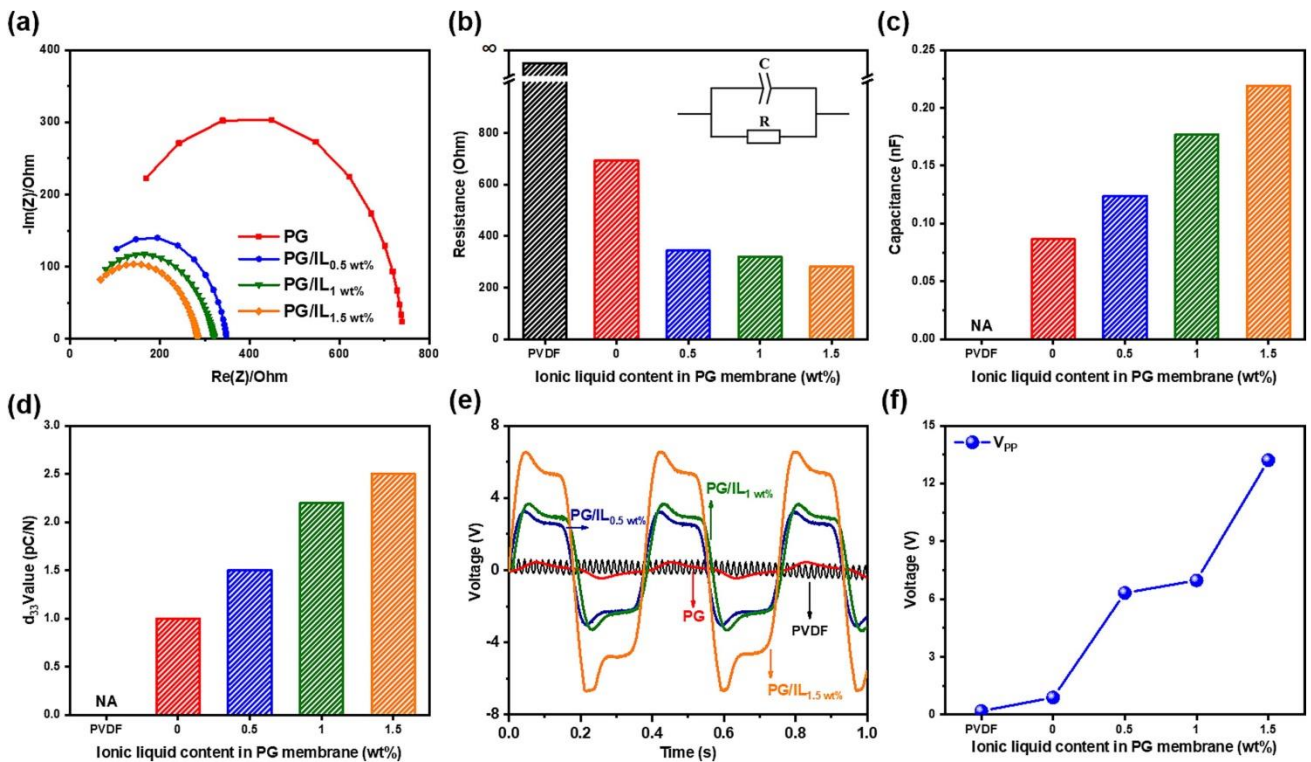


圖 7. (a)具有不同離子液含量的 PVDF 和 石墨烯仿生陣列薄膜與對應電阻值的奈奎斯特圖（線為擬合電路模型），(b) 電阻值，(c) 電容值使用 EC-Lab 軟體，(d) d_{33} 值，(e) 壓電響應，以及 (f) 不同離子液含量對於壓電輸出電壓的影響

此外，使用固定寬度為 5 cm 的 PG/IL 1.5 wt% 薄膜，測試不同的薄膜長度（8、10、12 cm），觀察不同風速（0–5 m/s）下的壓電變形輸出。如圖 8 所示。圖 8a-c 中的結果表明，所有不同長度的薄膜樣品在風速為 0m/s 時沒有表現出明顯的壓電響應。這是因為薄膜在靜態下不會變形，導致輸出電壓接近 0V。對於最短的薄膜（5×8cm），不同的風速無法提供足夠的變形，導致電壓輸出較低。隨著薄膜長度的增加，在風速為 4 m/s 時獲得最佳電壓輸出。然而，當風速達到 5 m/s 時，輸出電壓卻急劇下降。這可能是由於風速過大抑制了薄膜的振動和變形。

確定長度為 10 cm 的薄膜獲得了最好的壓電輸出，表明這個合適的薄膜長度可以在固定風速下實現最大的振盪形變並產生最高的電荷輸出。較大的薄膜面積（5×12 cm）分散了薄膜上的應力，使其不易發生振盪變形並降低電荷輸出。為了進一步研究風速對薄膜壓電性能的影響，我們測量了不同風速下薄膜的實際振盪幅度，如圖 8d 所示。結果表明，薄膜的振盪角隨著風速的增加而增加，從靜止狀態的 0°增加到最大風速 5 m/s 時的 25°。較大的振盪程度往往與薄膜的變形成正比。同時，薄膜穩定的壓電輸出來自於其穩定的往復變形過程。我們觀察到，當風速低於 4 m/s 時，薄膜表現出穩定的振盪，但當風速達到 5 m/s 時，薄膜的擺動角度最大，振盪幅度最小。因此，薄膜相應的壓電輸出（圖 8e）在風速為 4 m/s 時最高，達到 1.99 V，當風速增加到 5 m/s 時降至最低，為 0.09 V。最後，最佳的 PG/IL 1.5 wt% 薄膜長度為 5 × 10 cm，在風速 4 m/s、串聯 1MΩ 負載下進行測試，其功率密度達到 99.2 mW/m²。總體而言，上述結果表明，適當的薄膜長度和風速將有助於最大化薄膜的壓電響應輸出。最後，我們對相關研究[34]、[36]、大氣水集水和發電的性能進行了比較。圖 9 中的[61]、 [62]、 [63]、 [64]、 [65]、 [66]、 [67]、 [68]、 [69]、 [70]。本研究中製備的最佳化 PG/IL 1.5 wt% 薄膜表現出最佳的產水效率（0.63 LMH）和發電效率（99.2 mW/m²），支持其在同時產水和發電方面的實際應用潛力[71,72]。

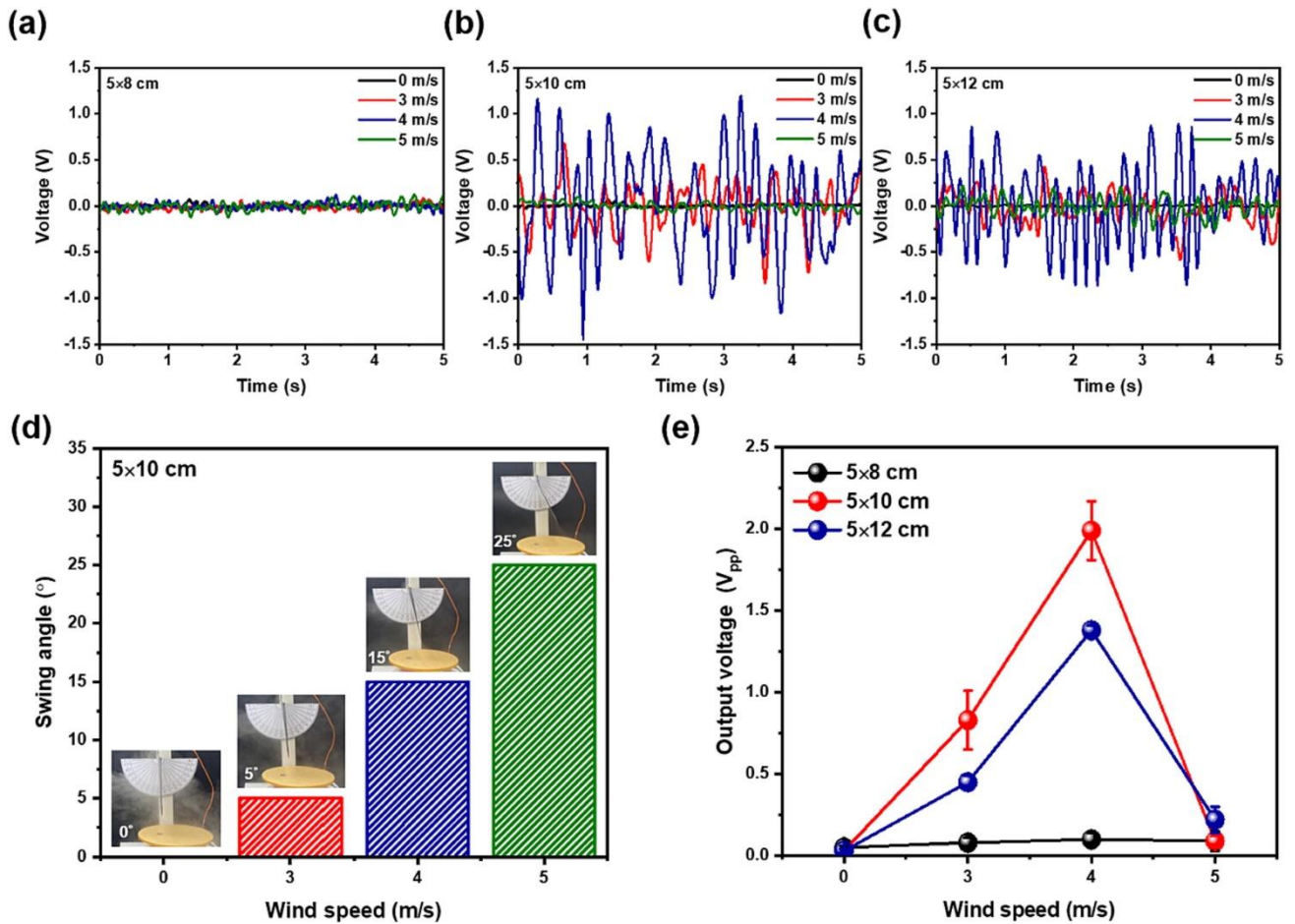


圖 9. (a) 5×8 cm、(b) 5×10 cm、(c) 5×12 cm 薄膜的輸出電壓訊號；(d) 5×10 cm 薄膜在靜態、風速為 3、4、5 m/s 範圍內的擺動角度；(e) 該薄膜的壓電電壓輸出（峰 to 峰值， V_{pp} ）。

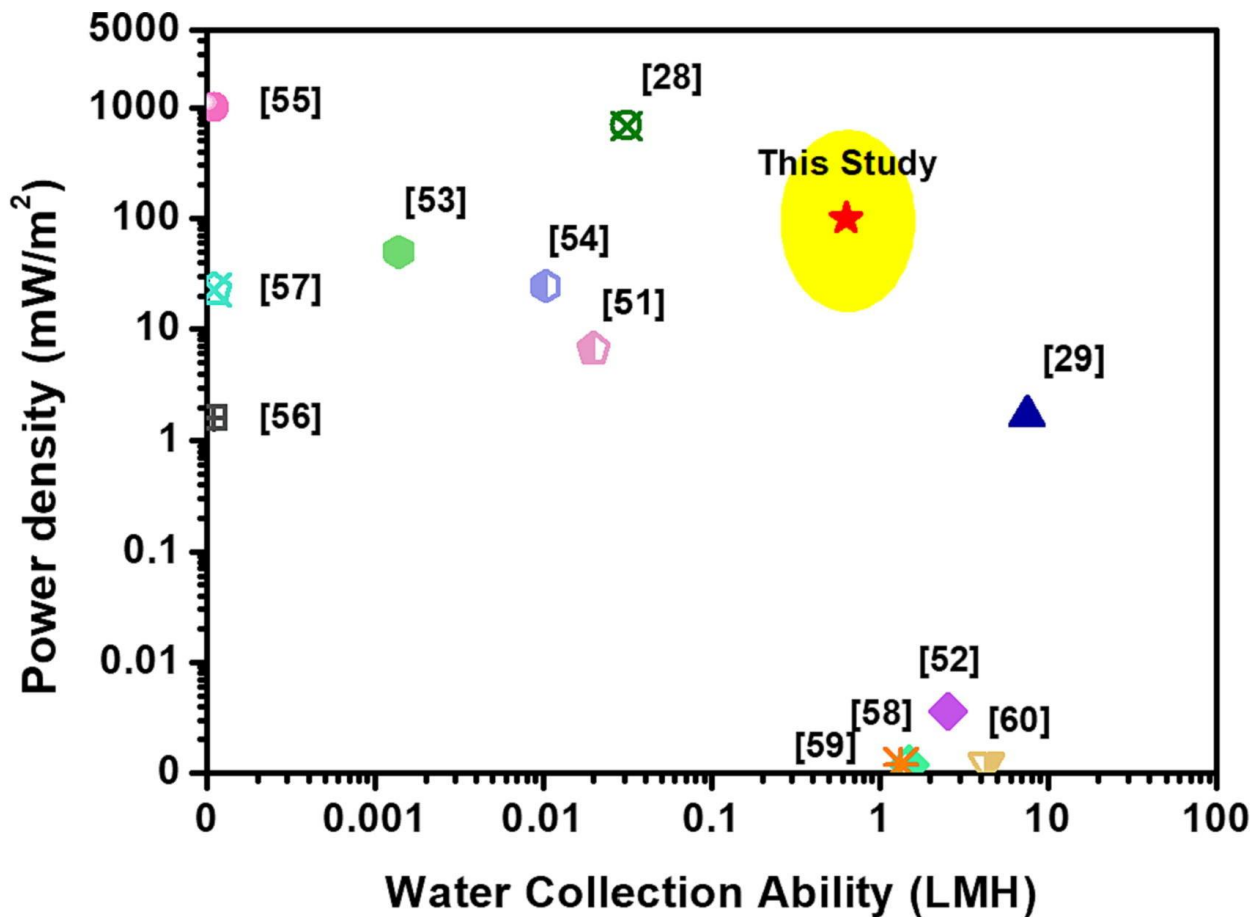


圖 9、呈現基於材料的各種能源產生和大氣水收集應用之比較。這些應用的相關研究文獻如圖中標示。

3.5. 石墨烯仿生陣列薄膜的同時霧取水、風產電原型機

最後，我們展示了使用優化石墨烯仿生陣列薄膜複合膜的原型裝置。這個裝置可以同時集霧和利用風力發電，就像圖 10a 所展示的那樣。我們透過影片 1 模擬了自然環境中的優化 4 m/s 風速和霧化器。從圖 10b 的結果可以看出，薄膜的產水率達到了 0.74 LMH。額外的風力讓霧氣能夠快速黏附在薄膜表面並與親水節點分離，因此產生了比靜態集水更高的產水率。另一方面，我們發現薄膜在穩定變形下可以儲存 489.3 nJ 的能量。這項研究的重要性在於證明了使用單一複合薄膜同時收集霧氣以進行水生產和風力發電的可行性。

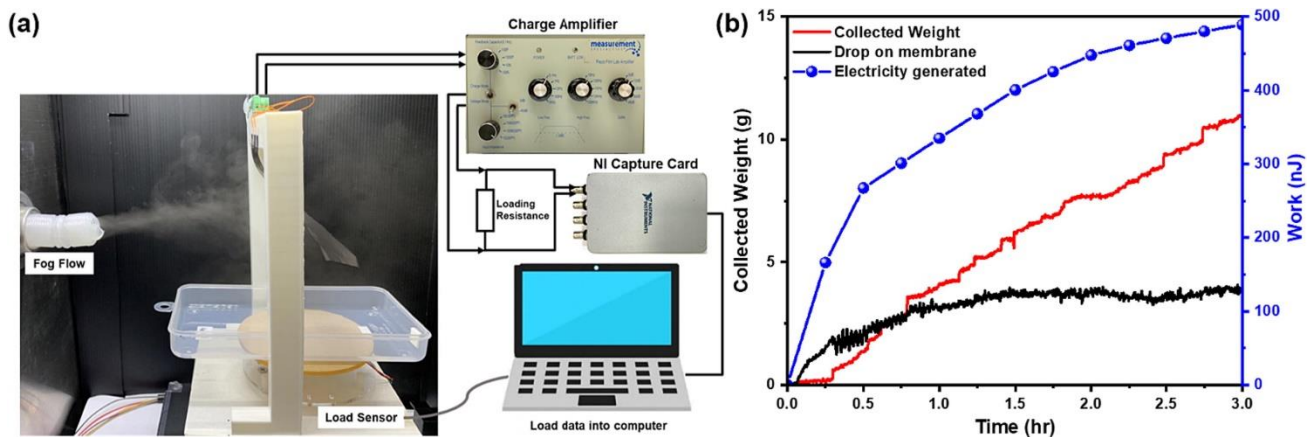


圖 10。(a) 示意圖和(b) 石墨烯仿生陣列薄膜與 0.2 mm CS 陣列和 5×10 cm 在 4 m/s 風速下同時收集的水、電變化量。

(四)、結論與應用

上述研究，我們成功地製造了一種新型的石墨烯仿生陣列壓電薄膜，它含有 PG/IL 1.5 wt% 並具有親水陣列可以同時收集霧水並產生風力發電。我們主要研究了聚偏氟乙烯 (PVDF)、石墨烯和離子液體 (IL) 之間的協同作用，這些作用導致了分子鏈的排列從 α 相轉變為壓電 β 相。通過在薄膜表面塗覆 0.2 毫米的殼聚糖陣列，我們描述霧水凝結和水珠滾動的過程，以實現了高達 0.63 升每平方米每小時 (LMH) 的集水效率。最後，我們證實了一種原型裝置的可行性，這種裝置可以同時收集霧水並產生風力發電。結果顯示，在 4 米/秒的霧風速下，集水效率為 0.74 LMH，發電量為 99.2 毫瓦/平方米 (mW/m^2)。種體而言，我們提出了一個全面的解決方案，可以解決偏遠地區水和電的短缺問題。

(五)、参考文献

- [1] M. McLennan, The Global Risks Report 2021 16th Edition, World Economic Forum
Cologne, Switzerland, 2021.
- [2] D. Fang, B. Chen, Linkage analysis for the water–energy nexus of city, *Applied
energy* 189 (2017) 770-779.
- [3] J.L. Schnoor, *Water–energy nexus*, ACS Publications, 2011, pp. 5065-5065.
- [4] J. Dai, S. Wu, G. Han, J. Weinberg, X. Xie, X. Wu, X. Song, B. Jia, W. Xue, Q.
Yang, Water-energy nexus: A review of methods and tools for macro-assessment,
Applied energy 210 (2018) 393-408.
- [5] M. Al-Shammiri, M. Safar, Multi-effect distillation plants: state of the art,
Desalination 126(1-3) (1999) 45-59.
- [6] D. Zhao, J. Xue, S. Li, H. Sun, Q.-d. Zhang, Theoretical analyses of thermal and
economical aspects of multi-effect distillation desalination dealing with high-salinity
wastewater, *Desalination* 273(2-3) (2011) 292-298.
- [7] M. Darwish, M. El-Refae, M. Abdel-Jawad, Developments in the multi-stage flash
desalting system, *Desalination* 100(1-3) (1995) 35-64.
- [8] T. Mezher, H. Fath, Z. Abbas, A. Khaled, Techno-economic assessment and
environmental impacts of desalination technologies, *Desalination* 266(1-3) (2011) 263-
273.

- [9] T.Y. Cath, A.E. Childress, M. Elimelech, Forward osmosis: Principles, applications, and recent developments, *Journal of membrane science* 281(1-2) (2006) 70-87.
- [10] D.L. Shaffer, J.R. Werber, H. Jaramillo, S. Lin, M. Elimelech, Forward osmosis: where are we now?, *Desalination* 356 (2015) 271-284.
- [11] C. Fritzmann, J. Löwenberg, T. Wintgens, T. Melin, State-of-the-art of reverse osmosis desalination, *Desalination* 216(1-3) (2007) 1-76.
- [12] I.G. Wenten, Reverse osmosis applications: Prospect and challenges, *Desalination* 391 (2016) 112-125.
- [13] K.W. Lawson, D.R. Lloyd, Membrane distillation, *Journal of membrane Science* 124(1) (1997) 1-25.
- [14] E. Drioli, A. Ali, F. Macedonio, Membrane distillation: Recent developments and perspectives, *Desalination* 356 (2015) 56-84.
- [15] O.S. Burheim, F. Seland, J.G. Pharoah, S. Kjelstrup, Improved electrode systems for reverse electro-dialysis and electro-dialysis, *Desalination* 285 (2012) 147-152.
- [16] J. Chen, M. Gu, Y. Zhou, D. Wan, Q. He, Y. Shi, Y. Liu, Efficient nitrate and perchlorate removal from aqueous solution via a novel electro-dialysis ion-exchange membrane bioreactor, *Chemical Engineering Journal* 430 (2022) 132952.
- [17] M.M. Mekonnen, A.Y. Hoekstra, Four billion people facing severe water scarcity, *Science advances* 2(2) (2016) e1500323.

- [18] B. Wang, X. Zhou, Z. Guo, W. Liu, Recent advances in atmosphere water harvesting: Design principle, materials, devices, and applications, *Nano today* 40 (2021) 101283.
- [19] J. de Dios Rivera, Aerodynamic collection efficiency of fog water collectors, *Atmospheric Research* 102(3) (2011) 335-342.
- [20] J. Olivier, C. De Rautenbach, The implementation of fog water collection systems in South Africa, *Atmospheric Research* 64(1-4) (2002) 227-238.
- [21] E. Kostal, S. Stroj, S. Kasemann, V. Matylitsky, M. Domke, Fabrication of biomimetic fog-collecting superhydrophilic–superhydrophobic surface micropatterns using femtosecond lasers, *Langmuir* 34(9) (2018) 2933-2941.
- [22] Y. Zhang, C. Zhu, J. Shi, S. Yamanaka, H. Morikawa, Bioinspired Composite Materials used for Efficient Fog Harvesting with Structures that Consist of Fungi-Mycelia Networks, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 10(38) (2022) 12529-12539.
- [23] Y. Zhang, F. Wang, Y. Yu, J. Wu, Y. Cai, J. Shi, H. Morikawa, C. Zhu, Multi-bioinspired hierarchical integrated hydrogel for passive fog harvesting and solar-driven seawater desalination, *Chemical Engineering Journal* 466 (2023) 143330.
- [24] Z. Lin, T. Wu, B. Jia, J. Shi, B. Zhou, C. Zhu, Y. Wang, R. Liang, M. Mizuno, Nature-inspired poly (N-phenylglycine)/wood solar evaporation system for high-

efficiency desalination and water purification, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 637 (2022) 128272.

[25] Y. Zhang, Y. Cai, J. Shi, H. Morikawa, C. Zhu, Multi-bioinspired hierarchical Janus membrane for fog harvesting and solar-driven seawater desalination, *Desalination* 540 (2022) 115975.

[26] B. Wang, Y. Zhang, W. Liang, G. Wang, Z. Guo, W. Liu, A simple route to transform normal hydrophilic cloth into a superhydrophobic–superhydrophilic hybrid surface, *Journal of Materials Chemistry A* 2(21) (2014) 7845-7852.

[27] W. Shi, H. Bai, M. Cao, X. Wang, Y. Ning, Z. Li, K. Liu, L. Jiang, Unidirectional Moisture Delivery via a Janus Photothermal Interface for Indoor Dehumidification: A Smart Roof, *Advanced Science* (2023) 2301421.

[28] H. Bai, X. Wang, Z. Li, H. Wen, Y. Yang, M. Li, M. Cao, Improved Liquid Collection on a Dual-Asymmetric Superhydrophilic Origami, *Advanced Materials* 35(17) (2023) 2211596.

[29] D. Zahner, J. Abagat, F. Svec, J.M. Fréchet, P.A. Levkin, A facile approach to superhydrophilic–superhydrophobic patterns in porous polymer films, *Advanced Materials* 23(27) (2011) 3030-3034.

[30] A. Kumar, K. Kumar, N. Kaushik, S. Sharma, S. Mishra, Renewable energy in India: current status and future potentials, *Renewable and sustainable energy reviews*

14(8) (2010) 2434-2442.

[31] S.E. Reza, T.A. Nitol, I. Abd-Al-Fattah, Present scenario of renewable energy in Bangladesh and a proposed hybrid system to minimize power crisis in remote areas, *International journal of renewable energy research* 2(2) (2012) 280-288.

[32] Y. Xu, Z. Bai, G. Xu, H. Shen, Constructing a versatile hybrid harvester for efficient power generation, detection and clean water collection, *Nano Energy* 94 (2022) 106932.

[33] Y. Chen, Y. Kuang, D. Shi, M. Hou, X. Chen, L. Jiang, J. Gao, L. Zhang, Y. He, C.-P. Wong, A triboelectric nanogenerator design for harvesting environmental mechanical energy from water mist, *Nano Energy* 73 (2020) 104765.

[34] T. Li, M. Wu, J. Xu, R. Du, T. Yan, P. Wang, Z. Bai, R. Wang, S. Wang, Simultaneous atmospheric water production and 24-hour power generation enabled by moisture-induced energy harvesting, *Nature Communications* 13(1) (2022) 6771.

[35] Z. Lin, T. Wu, Y.-F. Feng, J. Shi, B. Zhou, C. Zhu, Y. Wang, R. Liang, M. Mizuno, Poly (N-phenylglycine)/MoS₂ nanohybrid with synergistic solar-thermal conversion for efficient water purification and thermoelectric power generation, *ACS Applied Materials & Interfaces* 14(1) (2021) 1034-1044.

[36] F. Gong, H. Li, Q. Zhou, M. Wang, W. Wang, Y. Lv, R. Xiao, D.V. Papavassiliou, Agricultural waste-derived moisture-absorber for all-weather atmospheric water

collection and electricity generation, *Nano Energy* 74 (2020) 104922.

[37] J. Bae, T.G. Yun, B.L. Suh, J. Kim, I.-D. Kim, Self-operating transpiration-driven electrokinetic power generator with an artificial hydrological cycle, *Energy & Environmental Science* 13(2) (2020) 527-534.

[38] A.S. Aji, R. Nishi, H. Ago, Y. Ohno, High output voltage generation of over 5 V from liquid motion on single-layer MoS₂, *Nano Energy* 68 (2020) 104370.

[39] F. Wang, Y. Zhang, J. Shi, L. Sun, A. Ullah, C. Zhu, I.S. Kim, Bioinspired and Biodegradable Functionalized Graphene Oxide/Deacetylated Cellulose Acetate Composite Janus Membranes for Water Evaporation-Induced Electricity Generation, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* (2023).

[40] X. Zhang, J. Yang, R. Borayek, H. Qu, D.K. Nandakumar, Q. Zhang, J. Ding, S.C. Tan, Super-hygroscopic film for wearables with dual functions of expediting sweat evaporation and energy harvesting, *Nano Energy* 75 (2020) 104873.

[41] N.L. Panwar, S.C. Kaushik, S. Kothari, Role of renewable energy sources in environmental protection: A review, *Renewable and sustainable energy reviews* 15(3) (2011) 1513-1524.

[42] A.R. Parker, C.R. Lawrence, Water capture by a desert beetle, *Nature* 414(6859) (2001) 33-34.

[43] J. Widakdo, T.-J. Huang, T. Subrahmanya, H.F.M. Austria, H.-L. Chou, W.-S.

Hung, C.-F. Wang, C.-C. Hu, K.-R. Lee, J.-Y. Lai, Bioinspired ionic liquid-graphene based smart membranes with electrical tunable channels for gas separation, *Applied Materials Today* 27 (2022) 101441.

[44] H.Y. Lee, Y.H. Park, K.H. Ko, Correlation between surface morphology and hydrophilic/hydrophobic conversion of MOCVD–TiO₂ films, *Langmuir* 16(18) (2000) 7289-7293.

[45] H. Fan, K. Xiao, S. Mu, Y. Zhou, J. Ma, X. Wang, X. Huang, Impact of membrane pore morphology on multi-cycle fouling and cleaning of hydrophobic and hydrophilic membranes during MBR operation, *Journal of Membrane Science* 556 (2018) 312-320.

[46] A.A. Khan, M.M. Rana, G. Huang, N. Mei, R. Saritas, B. Wen, S. Zhang, P. Voss, E.-A. Rahman, Z. Leonenko, Maximizing piezoelectricity by self-assembled highly porous perovskite–polymer composite films to enable the internet of things, *Journal of Materials Chemistry A* 8(27) (2020) 13619-13629.

[47] L. Wan, W. Tian, N. Li, D. Chen, Q. Xu, H. Li, J. He, J. Lu, Hydrophilic porous PVDF membrane embedded with BaTiO₃ featuring controlled oxygen vacancies for piezocatalytic water cleaning, *Nano Energy* 94 (2022) 106930.

[48] P. Bei, H. Liu, H. Yao, Y. Jiao, Y. Wang, L. Guo, Preparation and characterization of a PVDF membrane modified by an ionic liquid, *Australian Journal of Chemistry* 72(6) (2019) 425-433.

- [49] H. Shang, Y. Wang, S. Limmer, T. Chou, K. Takahashi, G. Cao, Optically transparent superhydrophobic silica-based films, *Thin Solid Films* 472(1-2) (2005) 37-43.
- [50] X. Cai, T. Lei, D. Sun, L. Lin, A critical analysis of the α , β and γ phases in poly(vinylidene fluoride) using FTIR, *RSC advances* 7(25) (2017) 15382-15389.
- [51] W.-S. Hung, S.-Y. Ho, Y.-H. Chiao, C.-C. Chan, W.-Y. Woon, M.-J. Yin, C.-Y. Chang, Y.M. Lee, Q.-F. An, Electrical tunable pvdf/graphene membrane for controlled molecule separation, *Chemistry of Materials* 32(13) (2020) 5750-5758.
- [52] J. Zhang, X. Wang, X. Chen, X. Xia, G.J. Weng, Piezoelectricity enhancement in graphene/polyvinylidene fluoride composites due to graphene-induced $\alpha \rightarrow \beta$ crystal phase transition, *Energy Conversion and Management* 269 (2022) 116121.
- [53] L. Ruan, X. Yao, Y. Chang, L. Zhou, G. Qin, X. Zhang, Properties and applications of the β phase poly(vinylidene fluoride), *Polymers* 10(3) (2018) 228.
- [54] K.F. Mak, L. Ju, F. Wang, T.F. Heinz, Optical spectroscopy of graphene: From the far infrared to the ultraviolet, *Solid State Communications* 152(15) (2012) 1341-1349.
- [55] M. Mohammadi Ghaleni, A. Al Balushi, S. Kaviani, E. Tavakoli, M. Bavarian, S. Nejati, Fabrication of Janus membranes for desalination of oil-contaminated saline water, *ACS applied materials & interfaces* 10(51) (2018) 44871-44879.
- [56] F. Orudzhev, S. Ramazanov, D. Sobola, P. Kaspar, T. Trčka, K. Částková, J. Kastyl,

I. Zvereva, C. Wang, D. Selimov, Ultrasound and water flow driven piezophototronic effect in self-polarized flexible α -Fe₂O₃ containing PVDF nanofibers film for enhanced catalytic oxidation, *Nano Energy* 90 (2021) 106586.

[57] C. Xing, J. Guan, Y. Li, J. Li, Effect of a room-temperature ionic liquid on the structure and properties of electrospun poly (vinylidene fluoride) nanofibers, *ACS applied materials & interfaces* 6(6) (2014) 4447-4457.

[58] X. Chen, J. Wu, R. Ma, M. Hua, N. Koratkar, S. Yao, Z. Wang, Nanograsped micropyramidal architectures for continuous dropwise condensation, *Advanced functional materials* 21(24) (2011) 4617-4623.

[59] B. Marinho, M. Ghislandi, E. Tkalya, C.E. Koning, G. de With, Electrical conductivity of compacts of graphene, multi-wall carbon nanotubes, carbon black, and graphite powder, *Powder technology* 221 (2012) 351-358.

[60] IEEE Standard on piezoelectricity, *Ieee T Ultrason Ferr* 43(5) (1996) A1-A54.

[61] N.A. Shepelin, P.C. Sherrell, E. Goudeli, E.N. Skountzos, V.C. Lussini, G.W. Dicoski, J.G. Shapter, A.V. Ellis, Printed recyclable and self-poled polymer piezoelectric generators through single-walled carbon nanotube templating, *Energy & Environmental Science* 13(3) (2020) 868-883.

[62] K. Yang, T. Pan, I. Pinnau, Z. Shi, Y. Han, Simultaneous generation of atmospheric water and electricity using a hygroscopic aerogel with fast sorption kinetics, *Nano*

Energy 78 (2020) 105326.

[63] W. Lu, T. Ding, X. Wang, C. Zhang, T. Li, K. Zeng, G.W. Ho, Anion-cation heterostructured hydrogels for all-weather responsive electricity and water harvesting from atmospheric air, Nano Energy 104 (2022) 107892.

[64] L. Yang, S.K. Ravi, D.K. Nandakumar, F.I. Alzakia, W. Lu, Y. Zhang, J. Yang, Q. Zhang, X. Zhang, S.C. Tan, A hybrid artificial photocatalysis system splits atmospheric water for simultaneous dehumidification and power generation, Advanced Materials 31(51) (2019) 1902963.

[65] L. Yang, D.K. Nandakumar, L. Miao, L. Suresh, D. Zhang, T. Xiong, J.V. Vaghasiya, K.C. Kwon, S.C. Tan, Energy harvesting from atmospheric humidity by a hydrogel-integrated ferroelectric-semiconductor system, Joule 4(1) (2020) 176-188.

[66] S. Orrego, K. Shoele, A. Ruas, K. Doran, B. Caggiano, R. Mittal, S.H. Kang, Harvesting ambient wind energy with an inverted piezoelectric flag, Applied energy 194 (2017) 212-222.

[67] X. Shan, H. Tian, D. Chen, T. Xie, A curved panel energy harvester for aeroelastic vibration, Applied Energy 249 (2019) 58-66.

[68] J. McCarthy, S. Watkins, A. Deivasigamani, S. John, F. Coman, An investigation of fluttering piezoelectric energy harvesters in off-axis and turbulent flows, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 136 (2015) 101-113.

- [69] Y. Wang, L. Zhang, J. Wu, M.N. Hedhili, P. Wang, A facile strategy for the fabrication of a bioinspired hydrophilic–superhydrophobic patterned surface for highly efficient fog-harvesting, *Journal of Materials Chemistry A* 3(37) (2015) 18963-18969.
- [70] C. Li, Y. Liu, C. Gao, X. Li, Y. Xing, Y. Zheng, Fog harvesting of a bioinspired nanocone-decorated 3D fiber network, *ACS applied materials & interfaces* 11(4) (2019) 4507-4513.
- [71] L. Zhong, H. Zhu, Y. Wu, Z. Guo, Understanding how surface chemistry and topography enhance fog harvesting based on the superwetting surface with patterned hemispherical bulges, *Journal of colloid and interface science* 525 (2018) 234-242.
- [72] W. Wu, L. Wang, Y. Li, F. Zhang, L. Lin, S. Niu, D. Chenet, X. Zhang, Y. Hao, T.F. Heinz, Piezoelectricity of single-atomic-layer MoS₂ for energy conversion and piezotronics, *Nature* 514(7523) (2014) 470-474.

【評語】 030028

PVDF—graphene 有壓電現象在文獻上已有報導 (ENERGY Conversion and Management 2022, 269, 116121)，但同學對薄膜的製備及研究甚為投入，且對凝水研究有深入理解，值得鼓勵。