

# 從霧氣中取水的實驗與探討

## — 以苗栗三義茶園攔截霧水實驗為例

林敏朝／慈濟慈善基金會營建處處主任

林博雄／台灣大學大氣科學系副教授

### 摘要

本實驗係源自於苗栗三義丘陵地自然有機無毒的茶園於冬春季缺水問題，茶農提出深水井鑽探及數座水槽興建的工程計畫；惟為考量不破壞水土保持、節約用電、減少碳足跡與水足跡等理念，探究從霧氣中取水的生態環保友善作為，營造自然健康保育的環境，提供新水源作為茶園輔助性灌溉用水的可能性。

現階段我們台灣地區的主要水源係來自天上的降雨，以河川流水與水庫蓄水為主，地下水為輔；惟此獲得水源的方式在地處比較高的中高海拔區域農作區，在供應上有其耗能性與限制性。本實驗的發想是基於苗栗三義茶園的丘陵地區，近年來每年冬季與春季時期該地區連續數個月沒下雨或雨量微少的情況越趨明顯，導致茶園呈現缺水窘境越來越嚴重；另一方面，在此時期該區域日夜經常性被雲霧所籠罩，其相對溼度經常高達 95% 以上、能見度小於 1 km 甚至大部分時間都低於 500 m 的氣候特徵，乃有從霧氣取水的探究計畫。經由工作團隊一整年四個季節的二階段實驗發現：在 2013 年 11 月 1 日至 2014 年 4 月 30 日期間，實驗性簡易捕霧網（尺寸：3m\*1.8 m）自霧氣中攔截的霧水量高達 31,662 mm，換算體積約 602 公升，是同時期同區域臨時氣象站的紀錄雨量 178.4 mm 的 177 倍之多；該捕霧網每天可收集 7.83 公升／平方公尺，即每天每平方公尺有 1.45 公升霧水量的攔截成果。另外，經由本實驗也發現霧水攔截量發生在 2 ~ 5 ms<sup>-1</sup> 強度的

東北風下為最有效，這頗為符合該地區冬冬季風特性。

實驗結果顯示出在台灣部分地區如中海拔農作區，於冬春季缺水期間採取自霧氣中攔截取水的措施，以作為農業或民生輔助性用水應該是具有發展潛力的，也是台灣地區另一種可以發展新水源的替代方案。

### 前言

眾所周知，地球表面絕大部分的區域被水所覆蓋，但根據相關的資料顯示可作為使用的淡水只占全球水量的比例卻很低，只有約 2.5%，且當中只有 1% 的水量被我們人類利用。近年來，全球暖化所造成的極端氣候，水文環境變化呈現高度的不確定性，使得河流消失或田地乾旱已經被視為人類生存與文明的重大危機。聯合國秘書長潘基文在 2014 年 4 月警告：「今日全球有超過 7.8 億人口無法取得妥善的飲用水資源，而此情形在一些區域（非洲）尤其嚴重。」美國「智庫太平洋研究所（PACIFIC INSTITUTE）」則表示，糧食、農業與水息息相關，水資源短缺已在非洲、中東及亞洲各國引爆水資源爭奪戰<sup>[1]</sup>。這幾年來，我們經常在新聞報導中，可以看到地球的某些區域發生豪大雨水災的同時，另一區域卻是連續數個月的乾旱異常情況。全球水資源危機已經非常嚴峻，現在水資源短缺已經不只發生在未開發國家，氣候變遷也讓已開發國家對於供應穩定性的水也愈來愈沒有把握，就連「美國國務院」也預警水資源問題將危及國家安全。

全球暖化大幅改變了全球氣候的型態，也刺激了強烈颱風的形成。依據聯合國「政府間氣候變遷委員會」(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)的預測：「未來在某些地區熱帶性低氣壓的平均降雨量與最大降雨量增加的可能性增高」。國內近十年之氣候異常現象與天然災害已陸續發生，包括民國90年、92年及93年的颱風發生次數均高達9次，高出一般平均發生的6次；但在同時期，除了異常的大雨，在91及105年國內也出現嚴重的乾旱與五十年來最熱的夏季。由於氣候之異常，導致91、92及93及105年上半年連續乾旱，尤其南部、外島的澎湖及馬祖地區最為嚴重。從大旱之後緊接著大水，大水之後緊接著大旱，旱澇交替的現象似乎愈趨明顯，週期也愈縮短，此現象顯示出台灣已出現若干明顯之氣候異常徵兆。經濟部水利署2015年7月網站則清楚統計出：從1949到2011年的歷年統計來看，以往豐枯水年的從19年一循環，到近期大幅縮短為7年一循環，而且豐枯年的雨量多寡差距越來越大，不是水太多、就是水太少，台灣每年的雨量變化在數量和頻率已經顯得越來越極端化<sup>[2]</sup>。因此，在自然環境條件發生變化，既有系統的水資源開發、利用、保育、防災及管理諸多限制下，需要積極持續具體作為之外，新水源的探尋構想應該是值得嘗試與鼓勵的。

長久以來，苗栗三義丘陵地區每年冬季與春季經常性籠罩在雲霧當中，期間偶而仍會有些降雨量，提供當地茶園等農作物等穩定的水源，丘陵區的樹木生態生長狀況一直維持良好。但就在這幾年，資深茶農發現當地下雨的頻率降低且白天濃霧籠罩狀態已逐年漸進發生變化，濃霧籠罩的天氣時間縮短，僅有微雨或是連續數個月沒下雨情況發生，呈現水量缺乏的窘境。而另一方面，氣象局歷年氣象紀錄顯示，在此時期該區域經常性被濕霧所籠罩的現象，其相對溼度高達95%以上，氣溫則在20°C以下、能見度小於1 km甚至大部分時間都低於500 m的氣候特性<sup>[3]</sup>。因此，筆者興起從霧氣中尋找天然水源的可能性，邀請臺灣大學大氣科學系與氣象應用推廣基金會研究工作團隊，展開在台灣三義地區中海拔丘陵地進行一系列在季節性風力條件特性下自霧中攔截蒐集淡水的實驗，嘗試以自然無人為動力下為茶園尋找補助性灌溉用水。

白天的霧氣通常給我們日常生活帶來不便，但在台灣地區一直沒有相關單位與人士嘗試霧氣可以作為另類供水的來源。其實，在一些整年很少雨水但有霧的地方，霧是可以成為一個有效的飲用與灌溉水的來源。地球上不含鹽分的水有三分之一散佈在空氣中，收集空氣中的水，已是解決取得飲用水缺少問題的一個途徑，這在國外一些年降雨量少的地區是行之有年的嘗試與作為<sup>[4-10]</sup>。

## 世界捕霧網執行狀況簡介

全球許多地區為因應特殊地理條件與氣候特性所導致雨量極度缺乏，霧水攔截的應用在各大洲部分國家已有一些成功施行案例。智利北部的阿塔卡馬沙漠(Atacama Desert)是世界上最乾旱的沙漠之一，沙漠裡的很多地方從來沒有過降雨。該沙漠向面向太平洋海洋，但受到地形特殊因素及南太平洋副熱帶高壓影響，盛行下沉乾燥的離岸風，當秘魯寒流經過時，下層水汽只能凝結成雲或霧，難以形成雨；另一方面，沙漠東面的安第斯山脈阻擋了來自大西洋的濕潤水氣使該沙漠特別乾燥。氣象資料顯示，該沙漠年均降水量僅約1毫米。1988年該地區的民間團體為了解決海岸沙漠化缺水所引起的社會經濟問題，尋求國際捕霧水專家的技術幫忙與民眾共同參與，在距離海岸1.5公里海拔600公尺高面向太平洋的山坡地二處架設聚丙稀材質的捕霧網，歷經二年的測試，獲得平均每日每平方公尺1.46~7.12公升初步成果後，進行第二、三階段的擴大霧水攔截計畫，補霧網所攔截的霧水增加至每日每平方公尺10~15公升(相當每日獲得400~600公升)，並設置多達30,000公升儲水池。自霧中攔截的水質符合世界衛生組織規定的飲用水標準，除直接提供社區民眾飲用外，也結合滴灌技術提供農作物種植之用，霧水的儲蓄量一年可提供多達230天的灌溉使用，讓在沙漠中農業(含番茄、馬鈴薯、玉米、蘆薈及橄欖樹等等)發展成為可能<sup>[4,5]</sup>。非洲南非西側海岸亦是嚴重缺水地區，由於該地區發生霧的機率很高，而有了採集霧水提供缺水社區民眾使用計畫，該計畫持續3至4年在6個地點設置捕霧網，並設置氣象站自動紀錄雨量、風向與風速。該計畫發現霧的發生地點在標高200公尺以下的區域，所蒐集的每平方公尺達2.5公升，且水質良好適合民眾

引用<sup>[6,7]</sup>。歐洲南部葡萄牙在大西洋的群島（Maderia）是終年被朦朧的雲霧籠罩著，在海拔標高 600 ~ 1600 公尺進行為期 2 年自雲霧中攔截霧水的研究計畫，獲得每日每平方公尺 6.0 ~ 21.3 公升的水量，這相當於每日降雨量 33.3 ~ 56.4 mm，若在東北風向下，則相當雨量最高達每日獲得 250 mm。該計畫另一發現是由草木植物凝結滴下的水量是年雨量的 3.5 倍之多<sup>[8]</sup>。另一南美洲的秘魯西部山地和沙漠地區，屬熱帶沙漠、草原乾旱氣候，年平均降水量少於 50 mm。由於西臨太平洋，霧日較多，一些樹林生長良好。秘魯為開發霧水資源，在西海岸首都利馬以北 105 km 處拉奧羅亞和利馬以南 602 km 處阿雷基帕設立了兩個霧水收集站。該等霧水收集器是用尼龍網制成的，網上的小孔規格為 1 mm × 1 mm 大小，面積 4.5 m<sup>2</sup>。尼龍網支架下邊有一個大鐵盤收集霧水。1988 年 5 ~ 8 月兩個霧水站收集霧水最多的一年，在拉奧羅亞收集霧水 1336.2 公升，換算出雨量為 296.8 mm（網面積為 45 平方公尺），在阿雷基帕收集霧水量為 742.5 公升，即相當 165.1 mm 降雨量。此現象顯示出霧水資源作為緩解降雨缺乏水源問題，提供出一個解決辦法與一定的貢獻<sup>[9]</sup>。如上所述，迄今已多達 40 國家在全球進行較大規模的霧水攔截的推動，地區分布以太平洋東岸南美、大西洋東岸、非洲南部等為主如圖 1；亞洲地區則僅有沙烏地阿拉伯與尼泊爾二國，其尼泊爾所設置的捕霧網獲得的攔截水量每日每平方公尺約 1 ~ 10 公升，主要是提供山區僧侶們生活用水。截至目前全球各國設置的補霧網所攔截水量的紀錄，則每日每平方公尺有高達 70 公升之多的案例<sup>[10]</sup>。

台灣不屬熱帶也無沙漠，年度降雨量雖有高達約 2,000 mm，但是冬夏季節降水量極為不均勻如圖 2<sup>[2]</sup>，且絕大部分的雨水因台灣陡峭的地理因素，根據統計約有 60% 的降雨量流入海洋及約 20% 的雨量被蒸發<sup>[11]</sup>。而每年 10 月至翌年 4 月的冬季及春初季節時期，可能經常性面臨缺水問題，影響民生與農作物用水，這情況在台灣南部地區尤其明顯。本研究計畫首次嘗試在地處溫熱帶的台灣且冬季春季經常籠罩在霧氣中的丘陵地茶園中架設霧水攔截網，進行一系列空氣中攔截霧水的實驗與探究，除作為解決三義茶園在冬季春季缺水時期的輔助性水源外，亦可作為該園區在生態與環保教育的實際教案，甚至可作為台灣地區水資源的管及開發用方面，提供另類途徑的參考。

## 三義茶園捕霧網計畫的執行

### 茶園地區全年度氣象特徵

三義茶園地處苗栗台中交界處大安溪北岸的苗栗丘陵區域內，海拔高度在 450 ~ 550 公尺，由於該地南高北低縱向山形地勢與東北風氣候條件，造成該地區每年冬季到春季期間時有低雲霧現象。交通部國道高速公路局在苗栗三義國道一號高速公路 130 ~ 150 K 路段路肩架設能見度儀器來監測道路能見度以及發布行車警訊，顯見該區域特有的雲霧現象。

苗栗三義鄉地區氣候溫和，屬於亞熱帶高溫濕潤型氣候，惟因受地形之影響，三義鄉南北氣溫略有差異，全鄉一月份平均約攝氏十五度，七月份平均溫約攝氏二



圖 1 全球地區進行霧水攔截國家地點的示意圖

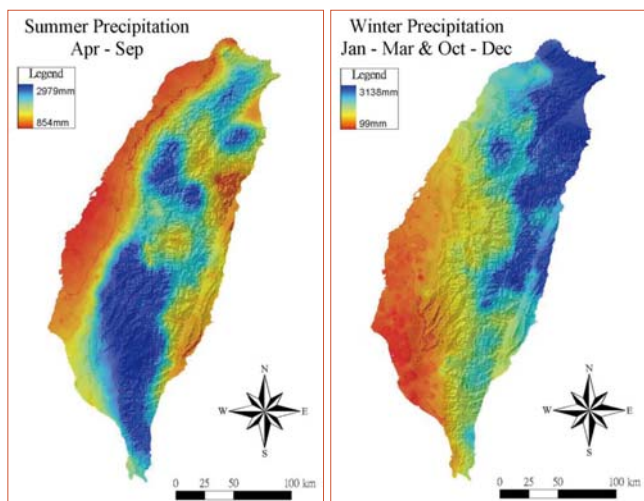


圖 2 台灣夏半年（左）與冬半年（右）降水分布圖

十八度，全年平均溫度為攝氏二十二度，日夜溫差大，適合果樹茶樹生長。為確切了解實驗地區茶園的氣候，研究期間在該茶園設置一區臨時氣象站（圖 3），記錄自 2013 年 12 月 9 日至 2014 年 12 月 10 日完整一年的氣溫、相對濕度、風速、風向、雨量、太陽輻射量以及能見度等氣象參數 1 ~ 12 月逐時的變化特徵。從三義茶園臨時氣象站一整年觀測發現以下特徵<sup>[3]</sup>：

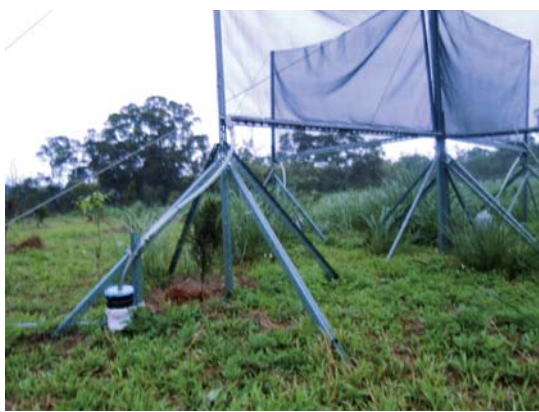


圖 3 本計畫架設的臨時氣象站 2013 年 12 月 22 日臨時氣象站與 A1 捕霧網

### ● 氣溫

2014 年各月每小時氣溫（單位是攝氏， $^{\circ}\text{C}$ ）變化顯示，小時平均的白晝夜間氣溫溫差不超過  $10^{\circ}\text{C}$ ，最高氣溫與最低氣溫分別發生在 9 月（ $35^{\circ}\text{C}$ ）和 2 月（ $4^{\circ}\text{C}$ ）。

### ● 相對濕度

2014 年各月每小時相對濕度（單位是百分比，%）變化顯示，2 ~ 4 月相對濕度都在 90% 以上，5 月突然下降到 60% 上下，6 ~ 7 月因梅雨回升到 80 ~ 90%，8 ~ 11 月下降到 60%，12 ~ 1 月再回升到 80% 以上。

### ● 風速風向

台灣屬於海島型氣候，風向受海洋、陸地溫差的影響很大，夏季吹西南季風，雷雨特別多，冬季吹東北季風，風力較強，尤其是尖豐公路（台十三線）伯公坑段，因受狹長及落差大的地形影響，風力特強，三義鄉全鄉是典型的季風氣候區。每年十月至翌年三月東北季風盛行，平均風速 1.1 ~ 1.3 m/sec，而五至九月為西南季風，平均風速 0.6 ~ 0.9 m/sec，但遇有颱風時其最大風速在 11.7 m/sec 以上。十月到隔年三月風速偏高並且這 6 個月最大風速都接近 8 m/s；該年度最大風速發生在十一月（約 9 m/s）。

三義茶園氣象站 2014 年 10 月到翌年 3 月風向都在北風（白晝）到東風（夜間）擺盪，4 ~ 9 月風向轉成西北風（白晝）到東南風（夜間）擺盪。

### ● 能見度

三義茶園氣象站顯示在 12 月到 3 月期間，能見度日夜都維持在 500 m 以下，其原因可能就是雲霧飄移通過茶園的影響，4 月到 10 月能見度持續升高，4 月和 6 月極大值可及 3,000 ~ 4,000 m，7~10 月極大值只有 ~ 1,000 m，11 ~ 12 月能見度最高可及 5,000 m（儀器之極限）或更遠；春秋冬三季節每天清晨和黃昏前後時段的能見度較低，中午和深夜回升；到了夏季月份，中午的能見度反而是一天中偏低時段，充分顯露山丘地區自然植被（茶園）蒸發散、午後下雨以及清晨黃昏雲霧等特色。

### ● 雨量

鄰近區域之三義雨量測站資料年平均降雨量約為 1968 公釐，除了 10 月至翌年 1 月之降雨量較少以外，其餘各月份均有可觀之降雨量，其中以九月最多，平均約達 340 公釐。

三義茶園氣象站 2014 年各月的雨量累積，全年雨量為 1,300 mm，比中央氣象局三義氣象站 2012 ~ 2013 年兩年的年雨量平均值 (2,686 mm) 短少 50%，但也有可能是 2014 年颱風偏少以及兩處氣象站的雨量筒口徑和傾斗解析度不同所造成。2014 年最大降雨量發生在 5 月 469 mm，6 月和 8 月也各將近 200 mm，10 月、11 月和 1 月等三個月雨量極少。雨量的總體特徵或許與全球氣候變異度有關，導致氣溫風速來得高。

● 太陽輻射量

2014 年各月每小時太陽輻射量 (單位是瓦/平方公尺，W/m<sup>2</sup>) 時間序列顯示中午時刻的太陽輻射量極低值發生在 12 月份 (~ 300 W/m<sup>2</sup>)，極高值 (> 600 W/m<sup>2</sup>) 則是 10 月份，兩月份相差 50%。

捕霧網計畫執行方法

● 三義茶園雲霧攔截網設置

三義茶園距台灣海峽僅約 1.2 公里，南北長約 2,200 公尺，東西寬約 250 公尺；整個茶園地形為北高南低且呈現東南傾斜，基於地形特性與未來後續推廣實用性的考量，攔截網架設地點共選三處，如圖 4 所顯示的 A1、A2 與 B1 等。A1 和 B1 兩地各置放一組十字形由四張排列組成的霧水攔截陣列 (如圖 5)，測試不同風向風速的攔截效率。A2 是西向陡降斜坡地，依照該斜坡地勢由下往上置放兩排攔截網 (每排 2 張攔截網)，各以 50% 和 70% 遮光率網面來測試不同網目密度的雲霧攔截效果。三處地點總共 12 張攔截網，嘗試評估每一區的霧水攔截量。2013 年 12 月 9 ~ 10 日完成攔截網安裝固定。

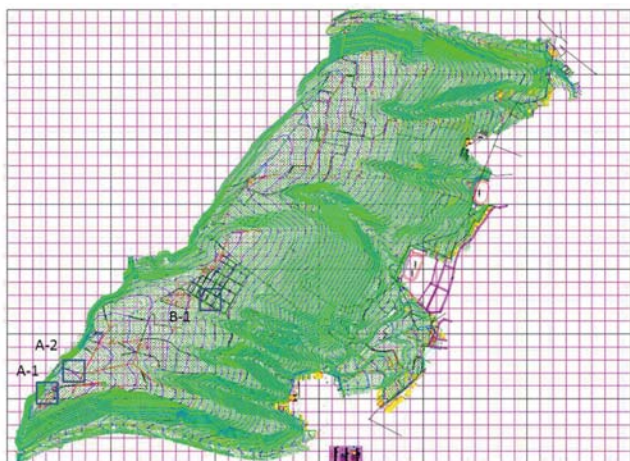


圖 4 三義茶園等高線平面圖與 A1, A2, B1 三處霧水攔截測試位置

為了兼顧材料經濟性與實用性，捕霧攔截網支架、網面材料與儲水溝槽等配件，均以台灣五金與園藝材料器材店容易購買取得的來源為主要考量因素。捕霧攔截網角鋼支架高度 3.6 m，攔截網高 1.8 m、長 3 m、下緣離地 1.8 m，並有角鋼橫撐架和塑膠排水管線到 20 公升塑膠水桶。攔截網上緣使用童軍繩拉開網面，並且利用四枝角鋼和 30 cm 營釘將兩側斜撐加以穩固在土地。這一設計是為不使用水泥灌漿破壞地表植被，以及拆卸與維修的便利性考量。攔截網網面材質是吉田塑膠公司所生產的農藝用黑色遮蔭網型號 610 (遮光率 50%) 以及型號 1010 (遮光率 70%) (如圖 6)，網面選擇黑色具有防止鳥禽誤撞網面而受傷的功能。

● 觀測紀錄

觀測期間的霧水桶裝紀錄與水桶重新置放工作，初期規劃是委由一位茶農協助處理；然而攔截網運作第一個月後發現 20L 水桶經常快速注水並滿溢，無法一一巡視及落實定量記錄每一水桶水位高度問題。因此本計畫於 2014 年 1 月 23 日於 A1 區最靠近氣象站攔截網下方，取消 20L 水桶改為置放與臨時氣象站同型雨量筒來承接攔截網所蒐集的水量，這一新增雨量筒 (有上蓋避免雨水直接滴落) 併入氣象站定量紀錄來取代人工紀錄。



圖 5 A2 與 B1 為測試不同風速風向攔截量而設的單面與十字型四面捕霧網



圖 6 (上) 吉田塑膠公司型號 610 (遮光率 50%) 黑色遮蔭網  
(下) 型號 1010 (遮光率 70%) 黑色遮蔭網

現地資料蒐集與研究分二階段進行，第一階段由 2013 年 11 月 1 日起自 2014 年 4 月 30 日止，現場架設一座臨時氣象站，受限於現地茶農難以落實達成定量數據之蒐集，於 2014 年 1 月 23 日起在臨時氣象站旁之攔截網增設一套筒口加蓋的雨量筒，便利直接記錄攔截網所蒐集的水量。2014 年 1 月 23 日中午到 4 月 9 日上午期間 (共 77 天)，總共紀錄 29 場具有顯著性的雲霧事件 (雨量筒五分鐘之內有  $\geq 5$  mm 水量流入以及持續一小時以上)，其中有 5 次雲霧事件持續時間超過 12 小時，它們發生在 2 月上中旬與 3 月上旬 (詳如表 1)。該臨時氣象站顯示三義地區的降水紀錄以及其他雲霧顯著個案大都發生在深夜、凌晨、清晨到上午這一區段，發生頻率

高於下午到夜間區段。與此同時期，臨時氣象站雨量筒水量 (VDR) 77 天內總計累計 178.4 mm，而水平移動的雨霧被攔截進入雨量筒 (FNR) 則高達 31,662 mm。

第二階段 (2014 年 5 月 1 日到 12 月 10 日) 執行規劃包括 (1) 持續完成該茶園臨時氣象站 5 ~ 12 月的當地氣象資訊全年度完整性蒐集與分析。(2) 探討茶園臨時氣象站與中央氣象局三義自動氣象站的異同程度。本研究計畫如期完成觀測資料彙整與分析，參數計有氣溫、相對濕度、風速、風向、雨量、能見度和太陽輻射量等七項，並說明它們 1 ~ 12 月逐月與每個月 0 ~ 23 小時的變化特徵，做為茶園日後環境管理之參考，以及未來在環境教育所需要的基礎背景資訊教材之引用。

## 研究結果分析

### 雲霧攔截量分析

透過臨時氣象站設置在捕霧網附近的一般性雨量筒 (VDR) 和下方霧水量筒 (FNR) 兩套雨量筒資料，來定量評估補霧網攔截霧水水量效果。兩套雨量筒 (S-RGB-M002) 筒口直徑是 15.4 cm，每一傾斗動作代表有 0.2 mm (降) 水量。圖 7 是在 2014 年 1 月 23 日到 4 月 9 日 (77 天) 期間進水紀錄的時間序列果 (兩種參數座標軸單位不同，相差 100 倍)，顯示 VDR 雨量筒累計 178.4 mm，三義地區這段期間偶有少量降雨，但是水平移動的雨霧被攔截並進入 FNR 雨量筒高達 31,662 mm，是 VDR 雨量筒數據的 177 倍之多；顯然，面積 5.4 m<sup>2</sup> 攔截網非常有效攔截雨水和雨霧水。圖 8 則以散布圖 (scattering chart) 來呈現兩個雨量筒水量的差異程度，可進一步得到  $FNR = 20.67 VDR + 1.28$  線性關係式，相關係數是 0.47<sup>[3]</sup>。

表 1 紅色粗體數字為捕霧網雨量筒 5 分鐘累積水量  $\geq 5$  mm 並持續 1 小時以上之個案一覽表

Day (M/D)	2/5	2/6	2/8	2/9	2/10	2/11	2/12	2/13	2/14	2/18	2/19	2/28	3/2	3/3
start-1	0:15	3:20	1:00	<b>0:00</b>	0:00	0:35	15:50	<b>5:15</b>	<b>0:00</b>	15:20	<b>0:10</b>	5:05	2:25	1:35
end-1	7:10	8:55	8:20	<b>0:00</b>	5:35	3:35	21:25	<b>0:00</b>	<b>22:30</b>	21:50	<b>19:00</b>	16:15	10:25	11:00
start-2			<b>21:55</b>			12:05							15:35	
end-2			<b>0:00</b>			16:45							20:45	
Duration	6:55	5:35	9:25	0:00	5:35	7:40	5:35	18:45	22:30	6:30	18:50	11:10	13:10	9:25
Day (M/D)	3/4	3/5	3/6	3/7	3/8	3/9	3/12	3/13	3/20	3/31	4/1	4/3	4/7	
start-1	2:40	0:00	<b>17:05</b>	<b>0:00</b>	4:30	<b>0:00</b>	20:05	6:20	9:20	02:20	00:40	17:25	06:30	
end-1	6:10	6:15	<b>0:00</b>	<b>8:55</b>	7:00	<b>7:40</b>	22:25	14:40	12:25	04:15	10:35	19:20	09:10	
start-2	22:40				<b>8:15</b>				14:15		17:45		18:40	
end-2	0:00				<b>0:00</b>				16:00		19:40		19:55	
Duration	4:50	6:15	6:55	8:55	18:15	7:40	2:20	8:20	4:50	1:55	11:50	1:55	3:55	

雨霧水攔截量和風速以及風向關係呈現在圖 9，風速風向是東北風  $2 \sim 5 \text{ ms}^{-1}$  風速太小或是風速太大都對應較低的雨霧攔截量。雨霧發生當時的相對溼度都高達  $95 \sim 100\%$  如圖 10 所示，氣溫則在  $20^\circ\text{C}$  以下如圖 11。本計畫執行期間雨霧發生期間的能見度小於  $1 \text{ km}$ ，甚至大部分低於  $500 \text{ m}$ ，吻合氣象界所定義的「霧」天氣條件（相對溼度接近  $100\%$  與能見度小於  $1 \text{ km}$ ）。

### 雲霧攔截量成果

本實驗性霧網在 2014 年 1 月 23 日到 4 月 9 日的 77 天期間攔截水量達 602 公升，換言之捕霧網平均  $1 \text{ m}^2$  有 106 公升水量蒐集率。假設 12 張攔截網都與臨時氣象站一旁有 FNR 雨量筒的攔截網朝向同一方位並有

相同集水效率，那麼這一段期間應可攔截達 6,900 公升水量，換算成台灣自來水公司 1 度 (= 1,000 公升) 用水量，這些攔截網蒐集到 6.9 度水量。對於水價便宜的台灣，這些雲霧被攔截網所收集的水平降水量雖然經濟效益不高，但是在沒使用電力與機械來主動取水，改以完全被動式方法來收集自然來源的雲霧水平移動降水的試驗性過程，卻得到相當程度的定量證據，證實我們對環境友善取水途徑的構想是值得推動與實踐<sup>[3]</sup>。

### 討論

#### 系統資料蒐集問題

本實驗性捕霧網系統之一的計水量筒，在初始階

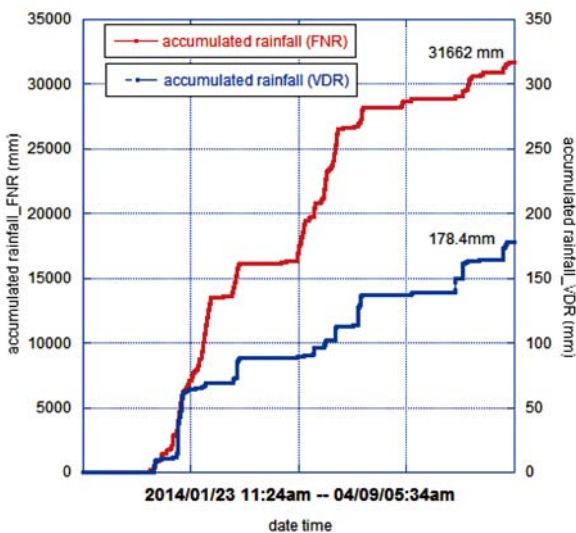


圖 7 2014/1/23-4/9 期間三義茶園 VDR 水量和 FNR 水量之時間序列

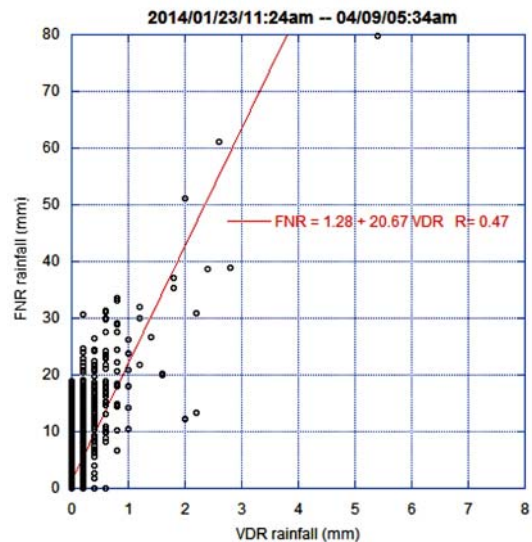


圖 8 2014/1/23-4/9 期間三義茶園 VDR 水量和 FNR 水量之散布圖

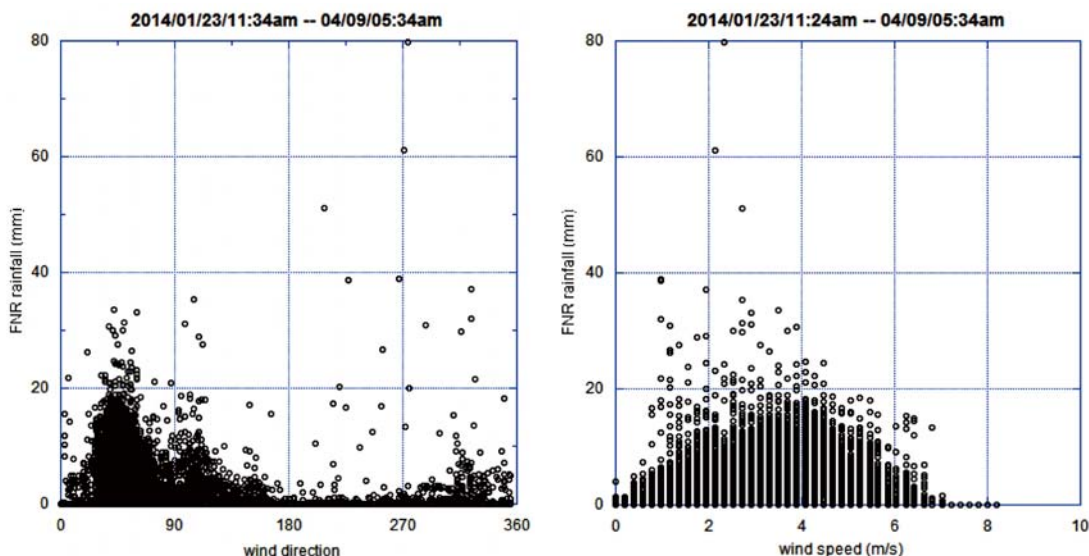


圖 9 2014/1/23-4/9 期間三義茶園 FNR 水量和 (左圖) 風速 (X 軸) 與 (右圖) 風向 (X 軸) 的關聯散布圖

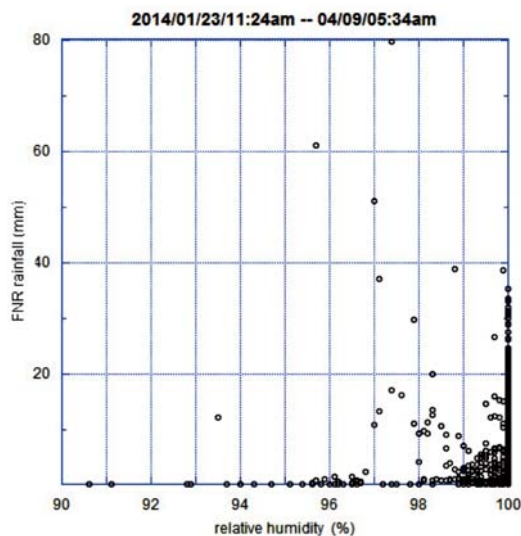


圖 10 2014/1/23-4/9 期間三義茶園攔截網 FNR 水量 (Y 軸) 和相對溼度 (X 軸) 的關聯散布圖

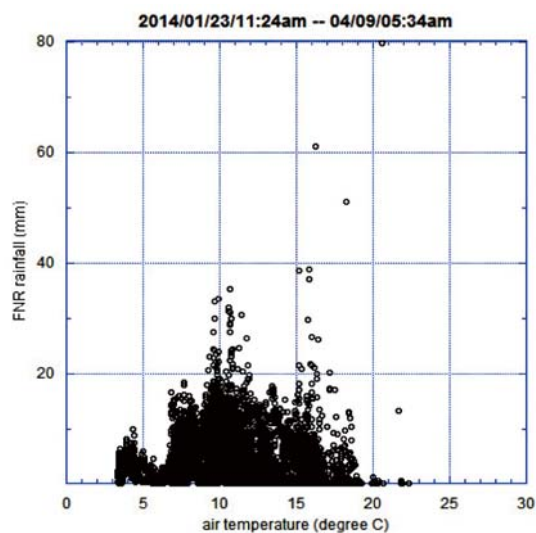


圖 11 2014/1/23-4/9 期間三義茶園攔截網 FNR 水量 (Y 軸) 和氣溫 (X 軸) 的關聯散布圖

段僅針對霧網而設置的簡單式水桶，且因人力問題而將記錄工作委由當地茶農登錄，但茶農必須忙於自身工作又缺乏正規訓練與不了解實驗意義等因素，不克定時定量地規律統計攔截的水量。因此，研究團隊檢討後重新設置兩個標準雨量筒，分別統計降雨量與霧網攔截的水量；另外，也針對當地氣候特徵設置臨時氣象站，將蒐集的氣象資料自動地傳送至研究室，有效地改善資料的正確性。惟完整性的實驗與氣候資料因委託時期僅一年而停止，期盼在未來經費許可下可再持續推動，以利可以更明確界定霧水的攔截措施在台灣地區是可行的。

### 捕霧網架的抗風能力與網收納考量

初設攔截網結構則以架設簡便、不破壞現地植被為設計導向；惟角鋼所擔任的支柱角色以及攔截網兩側之拉張效果不佳，這一結構在第一階段期間已有部分受損，難以在 5 ~ 11 月台灣進入雨季和颱風季強風暴雨下繼續蒐集雨霧。為因應台灣地區每年夏季的颱風等強風暴雨的侵襲，避免捕霧網所賴以支撐的骨架倒塌與捕霧網的破損，基金會已再進一步發展出可快速下降高度的不銹鋼材質支撐骨架系統，具有簡易、彈性又快速收納捕霧網機制的骨架，作為後續長期性實驗與使用功能。

### 捕霧攔截網材料使用的討論

此次實驗使用的捕霧網網材為市面上容易取得

的園藝用遮陽材料，日曬雨淋後有黑色染料脫落溶入水槽的缺點，不能將收集到的水直接善加利用，僅能作攔截水量統計之用。為達霧水直接達到可使用的目標，新型攔截網結構、攔截網材質、網目密度與攔截效率等進階細節，基金會邀請材料開發單位進行新網材設計與製作，並在 2014 年 12 月 30 日於三義茶園安裝兩面不同網材，其一仍為市面上容易取的遮光率 50% 之白色遮陰網，另一面為新研發之網材，各以 500L 儲水桶（附有液位計）來進行兩者收集霧水效率的比較，所獲得霧水水質已大幅度改善，達到雨霧水經收集後直接儲存提供茶園運用的目標。

初次實驗使用的簡易式捕霧網攔截水量約 7.83 L/m<sup>2</sup> (即 1.45 L/m<sup>2</sup>/day)，與文獻中其他地區部分案例初始實驗所獲得的水量相當，但與該等案例在實際裝置後所獲得的成果相比較的攔截量 3 ~ 12 L/m<sup>2</sup>/day 仍然偏低，雖然已以新研發的編織網材再次實驗也獲得攔截霧量可達 25.56 L/m<sup>2</sup>，惟此統計資料尚須進一步多方測試與驗證，但此成果已足以顯示出霧網攔截水量是有增加發展的空間。

### 捕霧網系統與環境的持續測試

簡易捕霧網的實驗歷經整年性不同季節的過程，蒐集三義茶園當地一年完整氣候資料特徵，如霧季發生月份與時間、發生頻率、測試霧水攔截網特性（面積、高度、架設方位等）與霧水蒐集量，能見度和風速風向等氣象參數的關聯性，已達成初步設定目標的



成果，對整體捕霧系統如上述新編織捕霧網材質等性能測試與研究仍須有需要持續辦理，同時也應蒐集更多國外成功案案例的信息與技術，作為因應台灣地區氣候條件的改善借鏡。

## 結論

就臺灣地區整體雨量的情況來說，每年 5 ~ 10 月豐水期的降雨量約佔年降雨量的七成，在臺灣南部地區甚至高達九成。而臺灣的地形特徵與說水文條件也很特別，陡峭地形使得河水湍急，雨水快速匯集至河流而奔入大海，停留在陸地的時間非常短暫，水資源利用與管理的難度很高；尤其在枯水期，中南部的降雨量非常少，能有效利用的水源更是缺乏。根據國內水文記錄，近十餘年來受到氣候變遷的影響，下雨天數集中，尤其枯水期的時間有拉長趨勢，這種氣候特徵越來越明顯與嚴重，影響民眾的生活與農作物的耕作。苗栗三義有機茶園顯然也受此氣候特徵的限制，導致近年來茶園發生缺水之苦。

世界許多地區設置捕霧網的案例及本實驗成果顯示出攔截霧水作為新鮮水源是一項簡易可行的技術。雖然目前捕霧網的設置大多是在一些非常缺乏雨水的乾燥國家與沙漠地區，對相對已開發或是部份開發中國家，縱使大部份民眾的用水是屬國家基礎建設所提供而不有欠缺問題；但總是會有一些中高海拔或特殊地形因素會面臨缺水或是供水不穩定的情況發生，此時，霧水的攔截與運用應是可考量作為一種補助性飲用水源的方案；尤其對農作物的耕作區，倘若再結合滴灌技術，當可擴大霧水攔截的功效。另外，霧水可作為造林、森林防火災的用水池、季節性乾燥特殊地區農作物與民眾生活用水，高山山林地區工作人員與登山客必要乾淨飲用水，甚至是高山地區動物生活用水等多方面價值的功效。

總而言之，從三義茶園設置捕霧網實驗初始成果的攔截水量雖然偏低，但經再嘗試引用新編織網，所攔截水量與水質已獲得改善且達到可直接提供農作物使用的目標。霧網攔截霧水具體措施仍有再精進之處，但已足以顯示出三義茶園霧水攔截實驗的成果亦如全球其他地區一般是具有實質可行性的；而且該實驗也可提供雲霧攔截科學及生態環保教育的教案，及關心新水源開發及環境保護保育議題的單位與企業後續投入研究的參考。

## 誌謝

本實驗得以嘗試首要感恩慈濟基金會 上人的支持，基金會一向關心全球氣候變遷、氣候異常與環保生態議題，鼓舞著我們構想如何以最節能且不造成環境不良的負荷條件下，推動節能減碳與珍惜天然資源運用的計畫與實踐。其次要感恩臺灣大學大氣科學系與氣象應用推廣基金會願意大膽接受委託進行研究與協助，也藉由他們在雪霸國家公園新竹觀霧工作站之雲霧調查經驗及接受斗膽提議採用在台灣容易購買取得的農藝用黑色遮蔭網型號 610（遮光率 50%）以及型號 1010（遮光率 70%）等簡易材料，迅速推動實驗計畫。另外也要感恩的是慈濟人援會給于簡報機會，尋得認同的環保企業家與大愛感恩科技公司參與捕霧網編織網絲材質的研發，以利後續增益捕水量與水質的推動，讓本實驗的成果有機會提供台灣地區未來獲取乾淨的天然水資源另一種途徑的參考。

## 參考文獻

1. 美國，智庫太平洋研究所（Pacific Institute）網路報導，2015 年 6 月。
2. 經濟部水利署，氣候變遷水環境知識庫網頁，2015 年 7 月。
3. 財團法人氣象應用推廣基金會，慈濟三義園區茶園霧水蒐集的可行性探討期末報告，2013 年 12 月。
4. Carter, V., Schemenauer, R. S., Osses, P., and Streeter, H. (2007), "The Atacama Desert Fog Collection Project at Falda Verde in Chile," *Proceedings of the First International Conference on FOX and FOX Collection*, pp. 15-20.
5. Larrain, H., Velasquez, F., Pinto, R., Lazaro, R., Cereceda, P., Osses, P., and Schemenauer, R. S. (2001), "Two Year of FOG Measurements at Site Falda Verde, North of Chanral (Chile)," *Conference on FOG and FOG Collection*, St. John's, Canada, pp. 15-20.
6. Olivier, J. (2003), "FOG-Water Harvesting along the West Coast of South Africa, A Feasible Study," *Water, SA*, Vol. 28, No. 4, pp. 349-360.
7. Olivier, J. (2004), "FOG Harvesting: An Alternative Source of Water Supply on the West Coast of South Africa," *GeoJournal*, Vol. 61, pp. 203-214.
8. Nascimento, S., Prada, S. N., and Sliva, M. O. (2001), "FOG Precipitation on the Island of Maderia, Portugal," *Environmental Geology, Case and Solution*, Vol. 41, pp. 384-389.
9. Schemenauer, R. S. and Cececeda, P. (1994a), "A Proposed Standard FOG Collector for Use in High Elevation Regions," *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 33, pp. 1313-1322.
10. Klemm, O., Schemenauer, R. S., Lummerich, A., Cereceda, P. Marzol, V., Corell, D., Heerden, J. V., Reinhard, D., Gherezghiher, T., Oliver, J., Osses, P., Sarsour, J., Frost, E., Maria, J. Strela, E., Valient, J. A., and Fessehay, G. M. (2012), "Fog as a Fresh-Water Resource: Overview and Perspectives," *AMBIO*, Vol. 41, pp. 221-234.
11. 周嫦娥 (2015)，台灣水資源需求現況與管理策略工具，*土木水利* 第 42 卷，第 4 期，第 19-29 頁。