中華農業研究 (Jour. Agric. Res. China) 49(2): 68～87 (2000)

氣輔噴霧系統之模擬評估[1]

蔡致榮　梁連勝　陸龍虎[2]

摘要：氣輔噴霧乃目前最常被推薦以減低噴霧飄移之一種技術，儘管已有許多研究顯示氣輔噴霧具減低噴霧飄移之優點，然而仍少有關最適操作條件之資料，更無氣輔噴霧於不同風速、前進速度以及前進方向下影響噴霧飄移之資料，本研究以電腦流體動力模擬軟體FLUENT®與反應曲面之統計方法，基於與傳統噴霧相較之飄移減低效果而評估氣輔噴霧系統之最適操作參數，並研究氣輔噴霧系統於不同風速、前進速度以及行進方向對降低噴霧飄移之影響。本研究所得之主要結論，歸納說明如後：氣流與噴嘴間夾角之大小對於氣輔噴霧之霧粒飄移不具明顯趨勢之影響；輔助氣流慣常使用氣流速度20至30 m/s之情形，在順風作業時已有應可接受-50%至-80%之相對飄移指標，惟在逆風作業時卻只有-5%至-22%之相對飄移指標，應以適時提高氣流速度而改善之；「區域相對風速愈大，飄移潛勢愈大」可完全解釋順、逆風作業，不同模擬風速與噴霧行進速度下相對飄移指數之變化情形。本研究所得之模擬成果除可提供氣輔噴霧實際操作所需之參考資料，更可使氣輔噴霧之本土化新技術發揮最佳之本能功效。

關鍵詞：氣輔噴霧、評估、模擬。

前　言

隨著環保意識之高漲，社會大眾對農藥使用日趨重視，消費者甚至熱衷於購買標榜無農藥殘毒之有機農產品。然而，爲達合理之經濟回收，農民將繼續使用農藥。儘管其他控制害蟲、疾病與雜草之替代方法將繼續被加以研發，農藥施用仍將是病蟲害防治之最有效工具。但是爲迎合大眾輿論並兼顧環境與農產業之折衷利益，農藥施用必須被視爲一項有價值之策略，且只於需要時才被使用，如此才能減少農藥施用之次數與數量。噴霧飄移(spray drift)乃農藥施用上最受注意之問題，其爲農產業所不欲見，除牽涉相關作業人員安全與健康之嚴重風險外，且有害於自然環境，因此，尋求降低噴霧飄移損失之方法相當重要。

氣輔噴霧(air-assisted spraying)乃目前最常被推薦以降低噴霧飄移之一種技術，據農漁牧產業自動化八十一年度人才培育計畫有關自動化病蟲害防治技術之研習報告[1]指出，一般而言，氣輔噴霧具有下述之優點：（一）可充份控制氣流以配合作物與施行噴藥之狀況（二）由於氣流之導引可增加霧粒穿透作物叢之效果（三）由於氣流之翻攪可提高葉背藥液附著度（四）降低施藥作業對天氣之依賴，因不易受風影響而提高田間工作效率達100~150%（五）可減少霧粒飄移達50~90%（六）較具有減低農藥使用量之可能性。由於該技術具有上述諸多特點，張氏等首度倡議引進該施藥設備與技術，隨後

---

1. 行政院農業委員會農業試驗所　研究報告第2026號。

2. 本所農業工程系副研究員、研究員兼系主任及助理研究員。台灣省　台中縣　霧峰鄉。

經農業自動化計畫「自動化施藥機械之引進與改良」，引進曳引機承載式氣流輔助噴霧器進行試用與推廣評估，並已由本所參考原設備於八十六年研發完成適合本省田間條件之小機型自走氣輔桿式施藥機，審度該技術之引進與本土化過程可謂進展迅速，唯對於該技術最適使用之理論探討目前仍付之闕如，爲求精進該項新技術並使其眞正植根國內，在國內有能力產製氣輔噴霧機之後，更應精益求精著手進行該技術更深一層之基礎理論研究。

本研究之目的旨在以電腦流體動力模擬軟體FLUENT®[6]與反應曲面之統計方法模擬評估氣輔噴霧系統與傳統噴霧相較之最適操作參數，並研究氣輔噴霧系統於不同風速、前進速度以及行進方向對降低噴霧飄移指標之影響，以提供氣輔噴霧實際操作所需之理論依據，冀使本土化氣輔噴霧技術能發揮最佳之本能功效。

文獻探討

一、氣輔噴霧

根據Hislop氏[8]所言，氣輔噴霧早在一百多年前於法國被開發出來供葡萄園噴藥作業使用。概念上而言，氣輔噴霧系統乃特殊設計之噴霧機，除具有傳統之霧化單元外，還有氣流供應單元可供輸氣流以攜帶並分散由霧化器所形成之霧粒。霧化單元必需製造充份且必需之壓力以供施噴農藥之霧化與形成霧粒；而氣流供應單元則由軸流風扇、氣囊與其他承接組件組成，係設計以產生均勻且穩定之氣流。當霧粒撞上向下流動之氣流，所需之噴霧樣式於是在噴桿下方形成，氣流隨後捕捉並遞送霧粒至作物株叢中。目前最常見的氣輔噴霧系統像Hardi Twin System，霧化器係在氣流外面，且以特定角度指向氣流中，從霧化器壓射出來的霧粒係在作物株叢上方特定位置與氣流交接，此種方式氣流與霧化器可獨立加以調節而得不同之操作組合，本研究係針對此類氣輔噴霧而進行相關探討。

氣輔噴霧之霧粒由於係由氣流捕捉與運送較不受風之影響，因此，氣輔噴霧系統可大幅地減低噴霧飄移[17,18,21,26]。此外，Taylor與Andersen氏[21]指出使用扁平扇形噴嘴於Hardi Twin System並傾斜氣幕向前可降低飄移達60%。當無氣流輔助時，增加噴藥前進速度噴霧飄移因之增加，但當有氣流輔助時就特定噴嘴而言，噴霧飄移被維持於幾近固定之數量。但是Young氏[26]於肯定氣流輔助具降低噴霧飄移功效之餘，也指出氣幕的功效隨著霧粒大小之增加而減低。

Watson與Wolff氏[23]試驗指出，對於玉米與大豆而言，噴藥採用氣流輔助可改善對整體植物之附著與附著均勻性，尤其對於上方植物與葉背表面之附著顯著增加。相同地，Manor氏等人[13]使用氣輔噴霧機達成棉花株叢底部較佳之穿透效果、較多噴霧於葉背表面，以及顯然比葉背較佳之噴霧附著於葉表。對於氣輔噴霧增加噴霧附著之正面效果，Womac氏等人[25]以及Howard氏等人[11]也有類似報告。

氣輔噴霧之相關研究較少牽涉生物性效能(biological efficacy)，Derksen氏[5]指出低施藥率之氣輔施噴技術相較於傳統高施藥率散噴作業(broadcast sprayer applications)可減少鮮食甘藍菜之農藥使用；而Grinstein氏等人[7]指出氣輔噴霧大約可降低種球洋蔥花梗上葉斑疾病(leaf spot disease)嚴重程度之75%，與傳統噴霧相較大約減低30%，可謂效果卓著。

儘管大部份之試驗顯示氣輔噴霧可減低噴霧飄移，但是某些研究也有不同的結果。Cooke氏等人[4]比較使用液壓噴嘴之噴霧機與Degania氣輔噴霧機於田間作物之噴霧飄移，儘管有較佳之霧粒分佈均勻度與相當之霧粒附著等效果，但氣輔噴霧機卻比液壓噴霧機產生較多之飄移。他們歸結指出除非像氣流速度與於目標作物上方噴霧釋放高度等之操作參數被加以最適化，否則噴霧飄移可能因之加劇。Hislop氏等人[9]也報告氣流輔助實質地減低風洞中風速爲4 m/s之噴霧飄移，但是於風速爲1與2 m/s下與行進方向成前向或後向45度之氣流輔助卻顯著地增加少量之噴霧飄移。Howard與Mulrooney氏[12]更

指出在空地情況下氣輔噴霧機相較於傳統行列噴霧機(row sprayer)有較高遠離目標區之飄移潛勢，尤其當較低施藥率與較高氣流速度被使用時爲最。

爲善用氣輔噴霧之正面優點，某些研究人員也研究氣流之最適化設定，Panneton 氏等人[15]基於某氣輔噴霧之研究而欲釐清氣流速度、氣流流量與氣流方向對葉面附著之影響，其中各獨立變數之範圍如下：氣流速度，0至36 m/s；氣流流量，0至1.3 $m^3/s/m$；而氣流角度，-10.2至40.2度。他們指出氣流速度對葉面附著有最大之影響，而較高之氣流速度與氣流流量相對地增加葉面附著，該研究所提出之最佳噴霧狀況乃使用氣流速度高於25 m/s，氣流流量大於0.9 $m^3/s/m$。而基於提供花椰菜(broccoli)與馬鈴薯所有葉背充分防護所得最適化噴藥狀況平均爲：氣流流量0.94 $m^3/s/m$，氣流速度31 m/s以及氣流角度22度。因爲此最適化操作參數之數值係位於所觀測範圍之邊緣，他們建議未來之研究應擴大研究之範圍以決定所得之數值是否代表眞正之最佳點。類似地，Ringel 與 Anderson 氏(引用 Pompe 與 Holterman 氏[16]之報告)使用 Hardi Twin System 噴霧機，研究氣流釋放角度(往前20度、垂直向下以及往後30度)與氣流速度(0、16與28 m/s)對飄移至空氣中與地面上以及霧粒沉積於冬麥上之影響，他們發現當氣流在最高速度（28 m/s）被以前向20度釋放時飄移至空氣中與地面上的量可最有效地減低，此與 Taylor 與 Andersen 氏[21]與 May 氏[14]之研究結果「後向傾斜之氣輔噴桿導致比垂直向下氣輔噴桿較多之噴霧飄移」相吻合。

二、噴霧飄移之電腦模擬

由於電腦科技精進，目前噴霧霧粒運動之電腦流體動力模擬相當進步，某些應用已顯現令人鼓舞之結果。Reichard 氏等人[19]首次以試驗驗証 FLUENT® 模擬風洞中噴霧飄移之準確性，他們發現由此軟體預測之飄移距離與由風洞試驗所獲得者相當吻合。更進一步決定各種變數對噴霧飄移距離之影響也由 Reichard 氏等人[20]推動，而 Zhu 等人[27]擴大模擬參數使達200 m之範圍以決定田間噴藥機之飄移距離。

使用基於二維度 Random-Walk 模式之電腦模擬，Hobson 氏等人[10]就承裝於噴桿之液壓噴嘴，對不同範圍之氣象與作物狀況研究噴嘴大小、角度以及操作壓力對噴霧飄移之影響。Weiner 與 Parkin 氏[24]使用 FLUENT® 以模擬來自車輛承載式微霧噴霧機之氣流，他們也預測霧粒之散佈但是並未加以驗証。Walklate 氏等人[22]使用同樣軟體以研究氣輔噴霧機於不同作物結構下氣流與霧粒傳輸之特性，他們指出儘管是相同大小之霧粒，但穿透進入植物之程度可能因噴嘴位置差異而大幅改變。尤其，當噴霧源位於主氣流前方時，霧粒會被迫向上移動而翻越噴桿。儘管孔隙介質(porous media)模式被併入以模擬作物叢間流(crop canopy flows)，並製作對應之速度向量，然而其所發表作物叢內霧粒之運動軌跡並不具太高價值，因爲此種模擬中作物對噴霧霧粒之過濾作用並未被眞實地反應出來。

使用相同電腦流體動力模擬軟體 FLUENT®，蔡氏與 Ozkan 氏[3]藉由比較飄移減低效果而進行氣流屏蔽式噴藥系統之設計評估，指出除了氣輔噴霧與擬氣流剪切噴霧外，具氣流速度大於40 m/s、氣流流量大於1.7 $m^3/s/m$，以及氣流角度爲15度之氣流屏蔽噴霧頗有希望成爲減低噴霧飄移之另類技術。蔡氏與 Ozkan 氏[2]使用同一軟體也模擬雙弧形薄板屏蔽，以研究行進中屏蔽於不同行進速度與行進方向對降低飄移之影響，其更進一步比較三維度氣流中機械式屏蔽與氣流式屏蔽行進中之屏蔽效果。

材料與方法

當氣輔噴霧被使用以涵括並傳送霧粒使免飄移時，氣流之速度、流量、角度、高度、壓力與初始紊流強度，以及噴嘴角度等對氣流輔助之性能扮演極重要之角色。然而，現有之資料卻極少可用以指定減低飄移所需之氣流速度與氣流流量。一般而言，低速與低流量之氣流可能不足以導引小霧粒向下

而降低飄移，相反地，高速與高流量之氣流可能導致霧粒被從地面或植物株叢反射而來之氣流往上攜帶。本研究中氣輔效果分兩階段加以評估，第一階段主要係針對本所現有氣輔噴霧機輔助氣流開口寬度1.5cm時氣流速度(V)、氣囊與噴嘴組角度(A)以及氣流與噴嘴間夾角(B)三因子(詳見圖1)作最適操作值之探討。爲便於相對比較，僅使用噴嘴之傳統向下噴霧逆風作業也包括於此模擬研究中當比較基準，其模擬所用之風速爲4m/s，而噴霧車之行進速度爲0.9m/s。爲以最少模擬組合有效獲得各模擬參數對降低飄移之影響，藉由使用中心複合設計(central composite design)之三因子反應曲面法設計所需之模擬狀況。

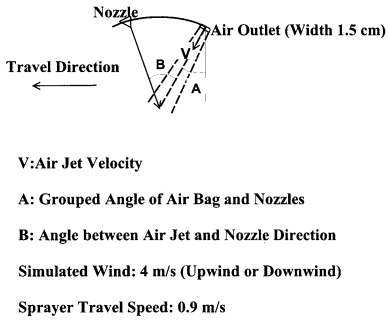


圖1. 氣輔噴霧最適操作模擬探討之參數。

Fig. 1. Operating parameters of the simulated air-assisted spraying.

依據中心複合設計(詳見圖2)每一因子必需有五位準以滿足此設計之要求，其標準化之碼值(coded values)分別爲-1.682、-1、0、1與1.682，其對應之氣流速度值爲4.77、15、30、45與55.23 m/s；對應之氣囊與噴嘴組角度值爲-33.64、-20、0、20與33.64度，此處0度係指氣囊與噴嘴組垂直向下；而對應之氣流與噴嘴間角值爲0、10.14、25、35.14與42.06度，此處0度係指氣流與噴嘴同方向；此中心複合設計標準化碼值之三維度原點係具氣流速度30 m/s、氣囊與噴嘴組垂直向下以及氣流與噴嘴間角爲25度。此階段之資料分析係使用逐步回歸(stepwise regression)程序以選取最佳配湊二階

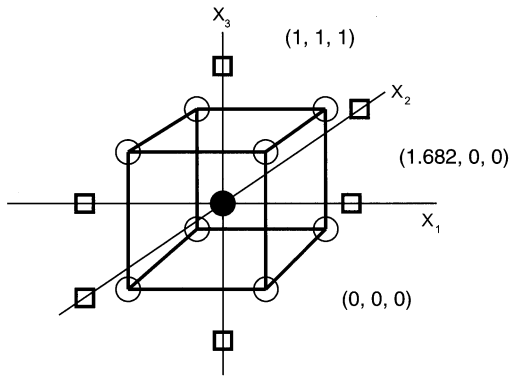
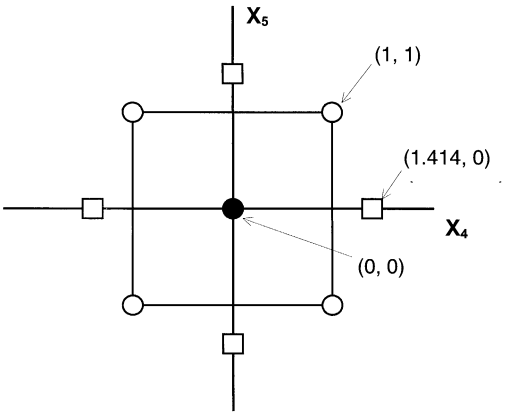


圖2. 三因子反應曲面法中央複合設計之變數領域。

Fig. 2. Three factor domain of the central composite design for response surface methods.

多項反應曲面方程式，隨後將依據此反應曲面方程式決定三探討因子之最適值。

氣輔效果之第二階段評估，主要係依據第一階段評估所獲具減低噴霧飄移之最適氣流速度、氣囊與噴嘴組角度以及氣流與噴嘴間角，進而探討氣輔噴霧於不同風速與噴霧行進速度下之相對飄移指標，類似第一階段評估中心複合設計之二因子反應曲面法(詳見圖3)被使用以設計所需之模擬狀況，其每一因子之五位準標準化碼值分別爲-1.414、-1、0、1與1.414，對應之風速值爲1.17、2、4、6與6.83 m/s，而對應之噴霧行進速度爲0.48、0.6、0.9、1.2與1.32 m/s；此中心複合設計標準化碼值之二維度原點係風速4 m/s與噴霧行進速度0.9 m/s。此階段之資料分析係使用多重回歸程序以配湊二階多項反應曲面方程式，並分析二探討因子之影響。



Central composite design for two factors

圖3. 二因子反應曲面法中央複合設計之變數領域。

Fig. 3. Two factor domain of the central composite design for response surface methods.

圖4顯示供氣輔噴霧操作參數評估之模擬領域，氣輔噴霧之氣流出口位於模擬風下風處1 m高度65 cm處，而模擬之噴嘴則位於以氣流出口順氣流下方25 cm處爲圓心具25 cm半徑之弧線上，其位置隨所模擬之氣流與噴嘴間夾角而定。模擬所用標準比較之噴嘴資料係以由Malvern雷射粒徑分析儀所獲得TeeJet XR 8002噴嘴之霧粒特性，按Rosin-Rammler粒徑與霧粒質量分佈[6]而得之下述公式：

$$M_d = e^{-\left(\frac{d}{179.5}\right)^{1.64}} \quad \ldots\ldots(1)$$

此處M_d代表所有霧粒粒徑大於某特定粒徑d之質量比率(以小數表示)，而d代表霧粒粒徑(以μ m表示)。爲著重於TeeJet XR8002噴嘴所產生霧粒之主要粒徑範圍，本研究中所有模擬只考慮粒徑從50至600 μ m，而且爲模擬方便只有200個霧粒被釋放並加以分析，其粒徑分佈按下述之線性公式決定之。

$$d_I = d_{\min} + \frac{d_{\max} - d_{\min}}{N - 1}(I - 1) \quad \ldots\ldots(2)$$

此處d_I代表第I個霧粒之粒徑(μ m)，d_{min}乃最小之霧粒粒徑(50 μ m)，d_{max}乃最大之霧粒粒徑(600 μ m)，N代表模擬之總霧粒數(200)，I係代表每一霧粒之指數，從1至N。模擬所釋放之200個霧粒可能沉積附著於地上或從位於噴嘴下風3 m處之出口而逃逸出模擬區域，本研究按Young氏之定義稱

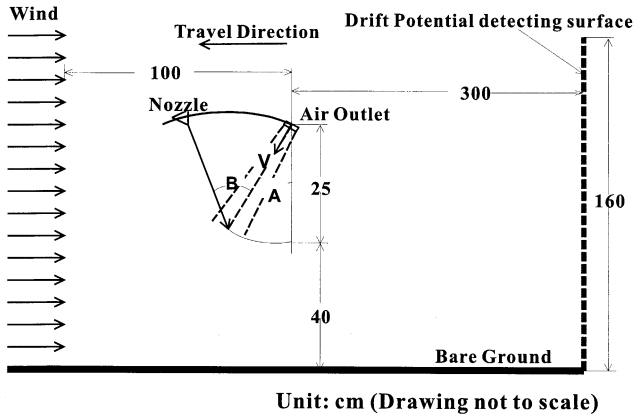


圖 4. 氣輔噴霧操作參數評估之模擬領域。

Fig. 4. The simulation domain of the air-assisted spraying.

此逃出模擬區域之部份霧粒爲飄移潛勢，並取其佔所釋放霧粒質量之百分比率爲飄移率，而分析與討論時則使用相對飄移指標，其係以百分率表示各模擬組合相對於傳統向下噴霧逆風作業之飄移率比較，亦即飄移率增加(正值)或減少(負值)之比率。

結果與討論

一、第一階段

第一階段模擬狀況與結果整理列於表 1，雖然模擬結果也包含霧粒在地面沉積率與霧粒於氣流壁附著率，但因霧粒在地面沉積率係與霧粒飄移率具相依關係，且氣輔噴霧時氣流壁霧粒附著並不重要，故未加以併入。此階段分析將對應氣流速度、氣囊與噴嘴組角度與氣流與噴嘴間夾角之標準化變數當作主變數，而以各種不同情況下之相對飄移指標當反應變數，亦即

$$RDI = f(X_1, X_2, X_3) \quad \ldots\ldots (3)$$

此處 RDI 係相對飄移指標(%)，X_1、X_2與X_3係對應氣流速度、氣囊噴嘴組角度與氣流與噴嘴間夾角之標準化變數。此階段資料經使用逐步回歸程序，分別就逆風與順風作業選得最佳配湊二階多項之反應曲面方程式如下：

逆風作業：

$$RDI = -12.625783 - 20.949593X_1 - 16.976472X_2 - 11.468695X_1^2 + 7.506083X_2^2 - 14.79075X_1X_2;$$
$$R^2 = 0.8955 \quad \ldots\ldots (4)$$

順風作業：

$$RDI = -77.417767 - 34.063463X_1 - 12.148539X_2 + 8.462326X_1^2 + 28.120355X_2^2;$$
$$R^2 = 0.9753 \quad \ldots\ldots (5)$$

由方程式(4)與(5)可知，雖然逆風作業比順風作業有較差之判定係數，但都有不錯之解釋能力，值得注意的是此兩方程式都不包含對應氣流與噴嘴間夾角之標準化變數X_3，此意謂著X_3對相對飄移指標並無任何影響，亦即氣流與噴嘴間夾角之大小對於氣輔噴霧之霧粒飄移不具明顯趨勢之影響，此由圖

表1. 第一階段[z]模擬狀況與結果

Table 1. Simulation conditions and results for the first stage

模擬組合	氣流速度 V(m/s)	氣囊與噴嘴組角度 A(度)	氣流與噴嘴間夾角 B(度)	飄移率(%)	相對飄移指數(%)
		逆風噴霧作業			
0	僅使用噴嘴之傳統向下噴霧，係相對比較用			65.770	0.00
1	15 (-1)[y]	-20 (-1)	10.14 (-1)	66.762	1.51
2	15 (-1)	-20 (-1)	35.14 (1)	76.120	15.74
3	15 (-1)	20 (1)	10.14 (-1)	63.793	-3.01
4	15 (-1)	20 (1)	35.14 (1)	62.903	-4.36
5	45 (1)	-20 (-1)	10.14 (-1)	67.043	1.94
6	45 (1)	-20 (-1)	35.14 (1)	75.149	14.26
7	45 (1)	20 (1)	10.14 (-1)	27.692	-57.90
8	45 (1)	20 (1)	35.14 (1)	20.492	-68.84
9	4.77 (-1.682)	0 (0)	25 (0)	64.806	-1.47
10	55.23 (1.682)	0 (0)	25 (0)	0	-100.00
11	30 (0)	-33.64 (-1.682)	25 (0)	80.280	22.06
12	30 (0)	33.64 (1.682)	25 (0)	55.134	-16.17
13	30 (0)	0 (0)	0 (-1.682)	47.399	-27.93
14	30 (0)	0 (0)	42.06 (1.682)	58.847	-10.53
15	30 (0)	0 (0)	25 (0)	57.885	-11.99
		順風噴霧作業			
16	15 (-1)	-20 (-1)	10.14 (-1)	65.377	-0.60
17	15 (-1)	-20 (-1)	35.14 (1)	75.836	15.30
18	15 (-1)	20 (1)	10.14 (-1)	56.793	-13.65
19	15 (-1)	20 (1)	35.14 (1)	53.004	-19.41
20	45 (1)	-20 (-1)	10.14 (-1)	21.710	-66.99
21	45 (1)	-20 (-1)	35.14 (1)	25.348	-61.46
22	45 (1)	20 (1)	10.14 (-1)	2.330	-96.46
23	45 (1)	20 (1)	35.14 (1)	3.164	-95.19
24	4.77 (-1.682)	0 (0)	25 (0)	63.934	-2.79
25	55.23 (1.682)	0 (0)	25 (0)	0	-100.00
26	30 (0)	-33.64 (-1.682)	25 (0)	79.294	20.56
27	30 (0)	33.64 (1.682)	25 (0)	57.801	-12.12
28	30 (0)	0 (0)	0 (-1.682)	18.831	-71.37
29	30 (0)	0 (0)	42.06 (1.682)	11.970	-81.80
30	30 (0)	0 (0)	25 (0)	15.049	-77.12

[z]相同之模擬狀況：模擬風速4 m/s，噴霧行進速度0.9 m/s，氣流出口寬度1.5 cm。

[y]括號內係對應之標準化碼值。

5所示第一階段各模擬組合不同氣流與噴嘴間夾角下相對飄移指標之散佈圖亦可窺見，不管逆風或順風作業其分佈都相當隨機而無明顯之趨勢變化，因此，實際應用上可選擇方便裝設之角度，本研究第二階段之分析氣流與噴嘴間夾角則採用慣常使用之30度角。

就逆風噴霧作業而言，模擬所得相對飄移指標之散佈與配湊之反應曲面示於圖6，符號▲代表不同氣流速度及氣囊與噴嘴組角度下之相對飄移指數，而配湊之反應曲面則以網格表現，該圖除可顯示不同氣流速度及氣囊與噴嘴組角度下相對飄移指數之散佈外，更可表現出配湊之反應曲面是否良好，

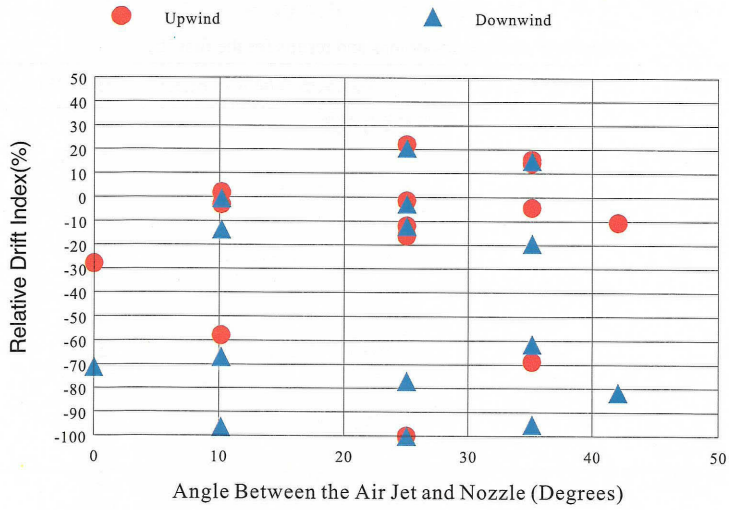


圖 5. 第一階段各模擬組合不同氣流與噴嘴間夾角下相對飄移指標之散佈圖。

Fig. 5. The scatter plot of relative drift indexes for droplets released at different angles between the air jet and nozzle for the first stage simulation.

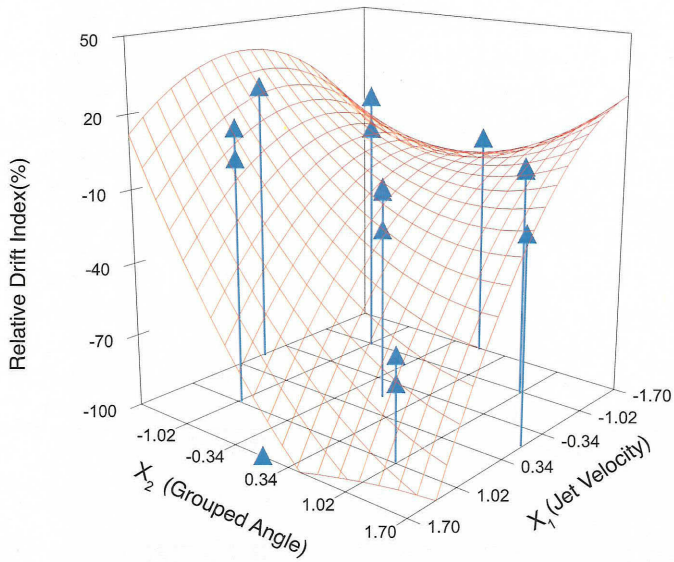


圖 6. 逆風噴霧作業不同氣流速度及氣囊與噴嘴組角度下相對飄移指數之散佈與反應曲面。

Fig. 6. The scatter and response surface of relative drift indexes for droplets released at various jet velocities and grouped angles of the air bag and nozzle for upwind spraying.

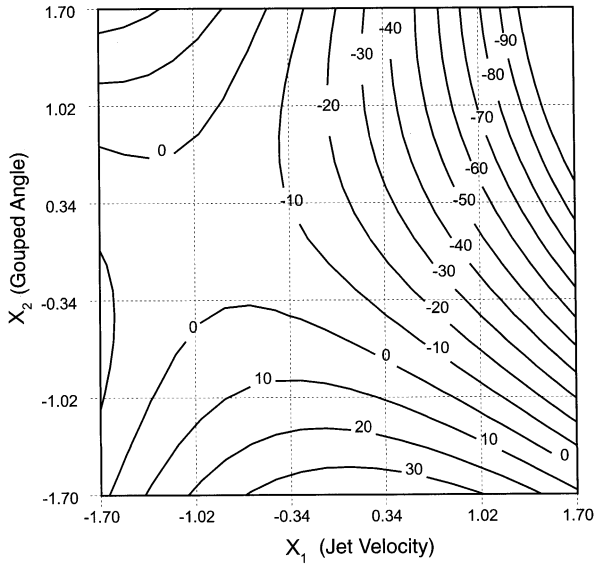


圖7. 逆風噴霧作業不同氣流速度及氣囊與噴嘴組角度下相對飄移指數之等高線圖。

Fig. 7. Relative drift index contours for droplets released at various jet velocities and grouped angles of the air bag and nozzle for upwind spraying.

由圖中可概略看出較大氣流速度與較大氣囊與噴嘴組角度可有較佳噴霧飄移減低效果之趨勢。爲仔細探討不同氣流速度及氣囊與噴嘴組角度對於相對飄移指數之影響，不同氣流速度及氣囊與噴嘴組角度下，逆風作業相對飄移指數之等高線圖示於圖7中。圖7顯示在觀測範圍內有一下降山谷位於第一象限，有兩上升山峰分佈於第二與第三象限，因此，具較佳噴霧飄移減低效果之部份係位於第一象限之下降山谷部份，其趨勢爲具較大氣流速度與較大氣囊與噴嘴組角度可有較佳噴霧飄移減低效果，惟於觀測範圍最大氣流速度及氣囊與噴嘴組角度時，具小於-100% 以下之相對飄移指標，只表示迴歸分析之概念意涵，並不具實際物理意義。由具較佳噴霧飄移減低效果之下降山谷部份觀之，在逆風作業情況下，使用逆風之輔助氣流比順風之輔助氣流具有較佳之噴霧飄移減低效果，此結果與前人研究結果[14, 16, 21]相吻合。

爲了解極值所在，反應曲面方程式(4)分別以X_1與X_2作微分處理，得極值所在平面之方程式如下：

$$0.98525X_1-X_2+1.130848=0 \quad \ldots\ldots(6)$$

$$1.55079X_1+X_2+1.416398=0 \quad \ldots\ldots(7)$$

其中與較佳噴霧飄移減低效果相關者乃方程式(6)，其倘繪於圖7之等高線圖中只是一斜率約等於1的直線，沿此線愈向觀測範圍外所使用氣囊與噴嘴組角度愈大，而對應之相對飄移指標愈小，因此，最佳之噴霧飄移減低效果勢必落在觀測範圍外，而觀測範圍邊緣極值線上相對飄移指標之最小值爲-50.25%，其係對應氣流速度38.67 m/s及氣囊與噴嘴組角度爲34度之情形。蔡氏等[3]就氣流屏蔽式施藥系統之設計評估曾指出，爲善用高氣流流量，氣流屏蔽之氣流角度不應太大，基於同樣考量，本研究後續逆風噴霧使用之噴霧條件，捨觀測範圍外之極值而選用氣流速度45 m/s及氣囊與噴嘴組角度16度，其係對應$X_1=1$、$X_2=0.8$與RDI= -65.65% 之情況，且位於區域較佳噴霧飄移減低效果部份(極值

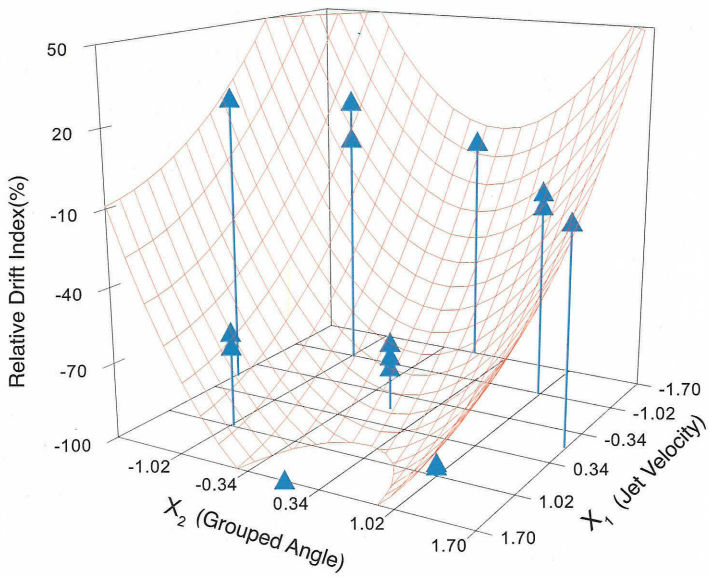


圖 8. 順風噴霧作業不同氣流速度及氣囊與噴嘴組角度下相對飄移指數之散佈與反應曲面。

Fig. 8. The scatter and response surface of relative drift indexes for droplets released at various jet velocities and grouped angles of the air bag and nozzle for downwind spraying.

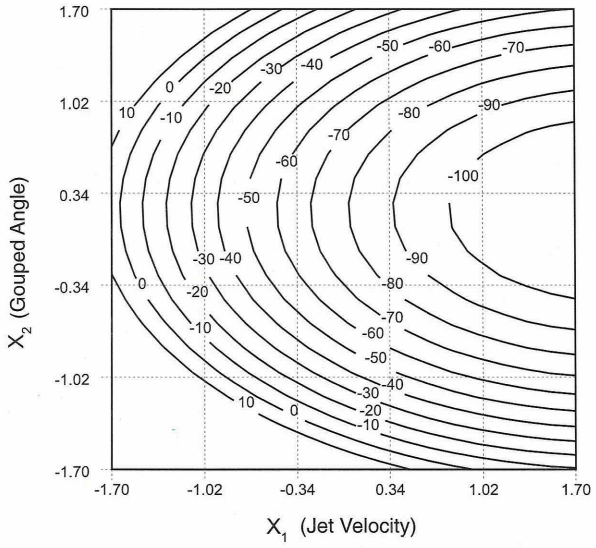


圖 9. 順風噴霧作業不同氣流速度及氣囊與噴嘴組角度下相對飄移指數之等高線圖。

Fig. 9. Relative drift index contours for droplets released at various jet velocities and grouped angles of the air bag and nozzle for downwind spraying.

線下方具較小氣囊與噴嘴組角度側、逆風輔助氣流及較大相對飄移指標)之中央。

相同地，就順風噴霧作業而言，模擬所得相對飄移指標之散佈與配湊之反應曲面示於圖 8，由圖中可概略看出較大氣流速度可有較佳噴霧飄移減低效果之趨勢。而不同氣流速度及氣囊與噴嘴組角度

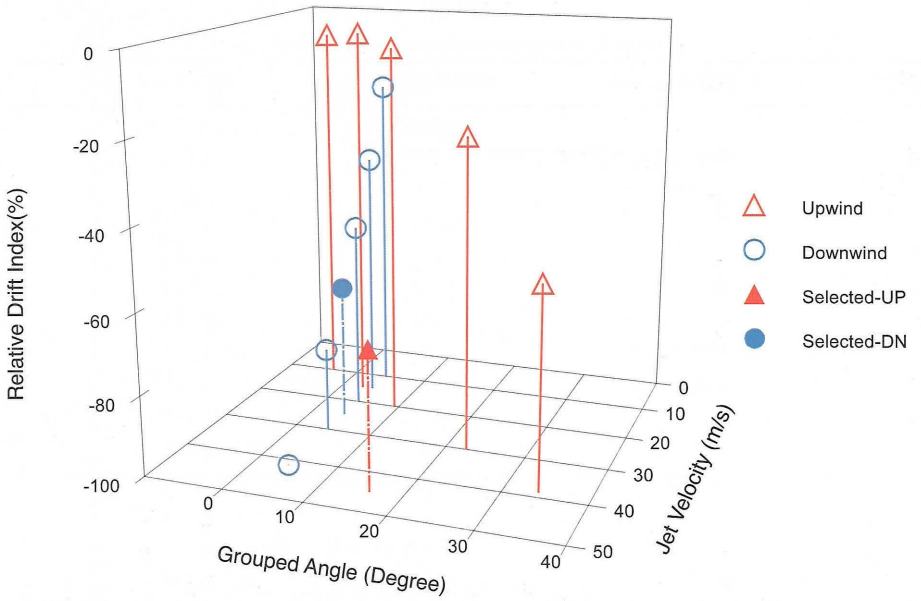


圖10. 沿極值線上不同氣流速度及氣囊與噴嘴組角度下相對飄移指數之變化。

Fig. 10. Change of some extremal relative drift indexes on response surface for droplets released at various jet velocities and grouped angles of the air bag and nozzle.

下，順風作業相對飄移指數之等高線則圖示於圖9中。圖9顯示觀測範圍內有一主要下降山谷，其趨勢爲具較大氣流速度可有較佳噴霧飄移減低效果，惟於谷底處相對飄移指標遠小於-100%以下，類似逆風作業所述，其只表示迴歸分析之概念意涵，並不具實際物理意義。圖9亦顯示順風作業並無「使用逆風之輔助氣流比順風之輔助氣流具有較佳之噴霧飄移減低效果」之情形，惟使用逆風之輔助氣流比順風之輔助氣流佔有較大有利降低噴霧飄移之可能操縱範圍。

就反應曲面方程式(5)而求極值所在，可得極值所在平面之方程式如下：

$$X_1=2.01 \quad \text{.....(8)}$$

$$X_2=0.216 \quad \text{.....(9)}$$

符合方程式(8)與(9)所代表線與反應曲面之交點遠超出觀測範圍，因此，基於節省輔助氣流能量消耗之考量，較適值之選擇必具有氣囊與噴嘴組角度4.3度，且具比X1=2.01所代表60.15 m/s小之輔助氣流速度。經由計算可知，氣流速度41.55 m/s與氣囊與噴嘴組角度4.3度具有-99.94%之相對飄移指標，而倘欲與本研究逆風作業所選較適操作條件具相同相對飄移指標(-65.65%)，則氣流速度爲24.7 m/s，爲方便後續模擬與分析比較，順風作業操作條件之較適值選定爲氣流速度爲24.7 m/s及氣囊與噴嘴組角度4.3度。

爲提供一般噴藥作業參考，根據本研究第一階段模擬結果，特別繪出順逆風作業沿區域極值線上不同氣流速度及氣囊與噴嘴組角度下，相對飄移指標變化之情形如圖10，其中△代表逆風作業情況下之相對飄移指標，○代表順風作業情況下之相對飄移指標，▲代表本研究第一階段選定逆風作業較適操作條件之相對飄移指標，●代表本研究第一階段選定順風作業較適操作條件之相對飄移指標，顯然地，順風作業時相對飄移指標隨著最受關切之氣流速度由10、15、20、30至大約40 m/s，而由-20%

表2. 第二階段模擬狀況與結果

Table 2. Simulation conditions and results for the second stage.

模擬組合	模擬風速(m/s)	噴霧行進速度(m/s)	飄移率(%)	相對飄移指數(%)
		逆風噴霧作業[z]		
0	僅使用噴嘴之傳統向下噴霧，係相對比較用		65.770	0.00
31	2 (-1)[y]	0.6 (-1)	0	-100.00
32	2 (-1)	1.2 (1)	0	-100.00
33	6 (1)	0.6 (-1)	28.051	-57.35
34	6 (1)	1.2 (1)	30.742	-53.26
35	1.17 (-1.414)	0.9 (0)	49.217	-25.17
36	6.83 (1.414)	0.9 (0)	44.897	-31.74
37	4 (0)	0.48 (-1.414)	0	-100.00
38	4 (0)	1.32 (1.414)	17.819	-72.91
39	4 (0)	0.9 (0)	12.977	-80.27
		順風噴霧作業[x]		
40	2 (-1)	0.6 (-1)	4.967	-92.45
41	2 (-1)	1.2 (1)	0	-100.00
42	6 (1)	0.6 (-1)	62.642	-4.76
43	6 (1)	1.2 (1)	62.378	-5.16
44	1.17 (-1.414)	0.9 (0)	5.650	-91.41
45	6.83 (1.414)	0.9 (0)	62.853	-4.44
46	4 (0)	0.48 (-1.414)	47.940	-27.11
47	4 (0)	1.32 (1.414)	10.720	-83.70
48	4 (0)	0.9 (0)	27.363	-58.40

[z]模擬狀況：氣流速度45 m/s，氣囊與噴嘴組角度16度，氣流與噴嘴間角30度，氣流出口寬度1.5 cm。

[y]括號內係對應之標準化碼值。

[x]模擬狀況：氣流速度24.7 m/s，氣囊與噴嘴組角度4.3度，氣流與噴嘴間角30度，氣流出口寬度1.5 cm。

遞減至-100%，可謂效果良好，然而，逆風作業時相對飄移指標隨著最受關切之氣流速度由10、15、20、30至大約40 m/s，卻僅由-5%遞減至-50%，由此可見逆風作業時即使可以提高輔助氣流速度而降低噴霧飄移，但其效果則遠不及順風作業時之效果。由此結果亦顯現，本研究模擬之氣輔噴霧機基於使用氣流出口寬度1.5 cm，在輔助氣流慣常使用氣流速度20至30 m/s之情形下，順風作業時已有應可接受-50%至-80%之相對飄移指標，惟在逆風作業時卻只有-5%至-22%之相對飄移指標，顯然逆風作業時使用如此氣流速度之飄移減低效果仍然不足，應以適時提高氣流速度而改善之。

二、第二階段

本研究第一階段評估具降低噴霧飄移之最適操作條件皆在觀測範圍外，爲探討氣輔噴霧於不同風速與噴霧行進速度下噴霧飄移指標之變化，第一階段評估所獲具減低噴霧飄移之較適操作條件，逆風作業爲氣流速度45 m/s，氣囊與噴嘴組角度16度及氣流與噴嘴間角30度，而順風作業爲氣流速度24.7 m/s，氣囊與噴嘴組角度4.3度及氣流與噴嘴間角30度，被使用於第二階段之模擬，類似第一階段之作法，其模擬狀況與結果整理列於表2。此階段分析將對應模擬風速及噴霧行進速度之標準化變數當作主變數，而以各種不同情況下之相對飄移指標當反應變數，亦即

$$RDI = f(X_4, X_5) \quad \ldots\ldots (10)$$

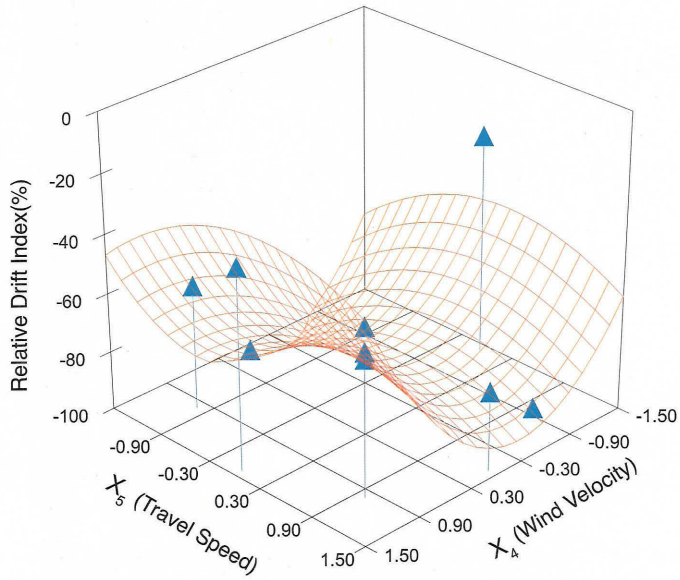


圖 11. 逆風噴霧作業不同模擬風速及噴霧行進速度下相對飄移指數之散佈與反應曲面。

Fig. 11. The scatter and response surface of relative drift indexes for droplets released at various wind velocities and travel speeds for upwind spraying.

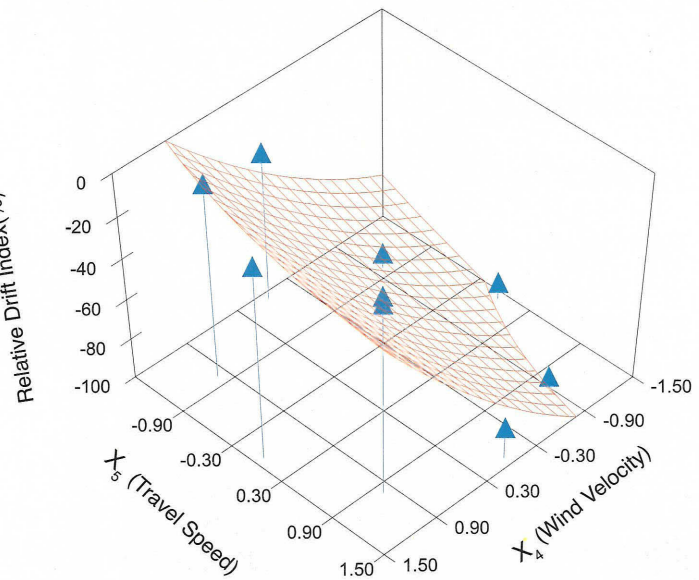


圖 12. 順風噴霧作業不同模擬風速及噴霧行進速度下相對飄移指數之散佈與反應曲面。

Fig. 12. The scatter and response surface of relative drift indexes for droplets released at various wind velocities and travel speeds for downwind spraying.

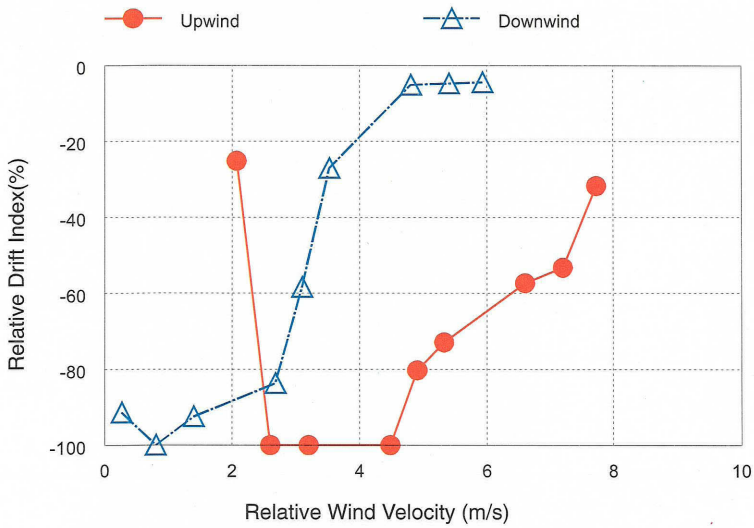


圖13. 第二階段模擬不同相對風速下順逆風作業相對飄移指標之變化情形。

Fig. 13. Change of relative drift indexes for droplets released at various relative wind velocities for the second stage simulation.

此處RDI係相對飄移指標(%)，X_4與X_5係對應模擬風速及噴霧行進速度之標準化變數。此階段之資料經使用多重回歸程序，分別就逆風與順風作業得二階多項反應曲面方程式如后。

逆風作業：

$$RDI = -80.267559 + 10.014015X_4 + 5.300208X_5 + 20.861482X_4^2 - 8.147278X_5^2 + 1.0225X_4X_5; \quad R^2 = 0.69178 \quad \ldots\ldots (11)$$

順風作業：

$$RDI = -58.400129 + 38.193965X_4 - 10.997693X_5 + 5.506844X_4^2 + 1.765714X_5^2 + 1.7875X_4X_5; \quad R^2 = 0.9216 \quad \ldots\ldots (12)$$

由方程式(11)與(12)之判定係數可知，順風作業之反應曲面方程式(12)具有不錯之解釋能力，惟逆風作業之反應曲面方程式(11)則因解釋能力不佳而無法用以作進一步之分析，此亦可由圖11與圖12有關逆、順風作業下模擬所得相對飄移指標之散佈與反應曲面配湊之情形而窺見，圖11中顯然可見對應模擬風速1.17 m/s (X_4= -1.414)與逆風噴霧行進速度0.9 m/s (X_5=0)之相對飄移指標-25.17%與所配湊之曲面差異甚大，實是迴歸模式解釋能力不佳之主因。據蔡氏等[2]於噴霧屏蔽行進中性能之模擬研究中指出，風速與噴霧行進速度間區域相對速度在控制行進中噴霧機之噴霧飄移上扮演重要角色，區域相對風速愈大，飄移潛勢愈大，因此，爲釐清模擬所得相對飄移指標與反應曲面無法有效配湊之原因，特將順、逆風作業下不同相對風速之相對飄移指標繪製如圖13所示。圖13清楚顯現逆風噴霧作業比順風噴霧作業承受較大之相對風速，且與蔡氏等所指「區域相對風速愈大，飄移潛勢愈大」相吻合，惟逆風作業於大約2 m/s相對風速時，有嚴重例外之情形，其乃因模擬逆風噴霧作業所用45 m/s之氣流速度相較於2 m/s相對風速顯然過大，以致於輔助氣流因地面阻擋而轉向並向前流通(見圖14)，其霧粒因之大量飛揚(見圖15)成爲噴霧飄移，而使相對飄移指標大量上揚而無法與迴歸模式相吻合。

在了解上述無法與迴歸模式相吻合之例外情形後，爲方便進一步仔細探討逆風作業不同模擬風速

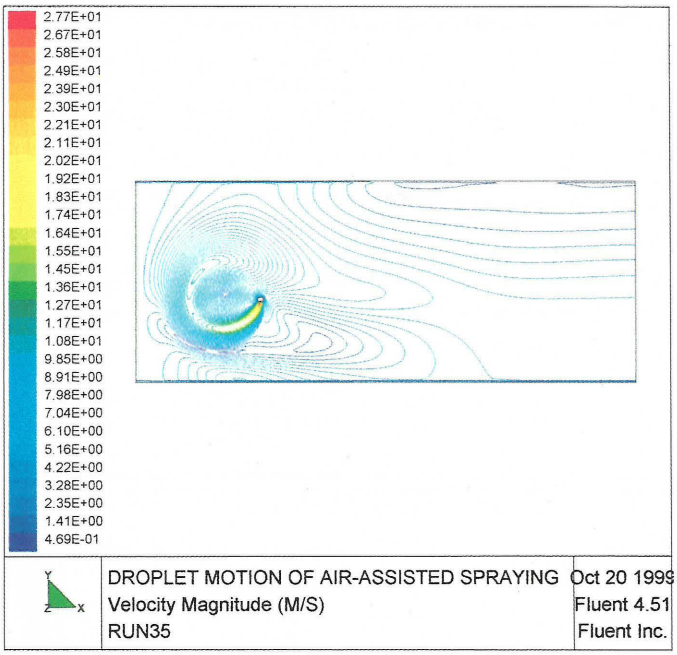


圖14. 低相對風速下輔助氣流速度顯然過大時輔助氣流之轉向。

Fig. 14. Flow field shows the deflected jet of air-assisted spraying with too large jet velocity under a condition at low relative wind velocity.

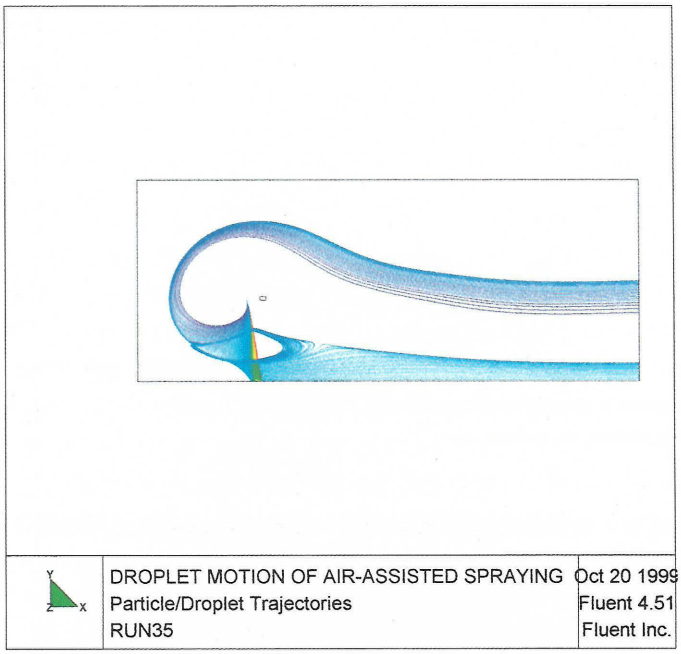


圖15. 低相對風速下輔助氣流顯然過大時氣輔噴霧之霧粒軌跡。

Fig. 15. Droplet trajectories of an air-assisted spraying case. Conditions same as figure 14.

與噴霧行進速度對相對飄移指標之影響，特將前述例外之模擬組合捨棄，再重新進行多重回歸程序獲得二階多項之反應曲面方程式如下：

$$RDI = -80.269778 + 22.997186X_4 + 5.300208X_2 + 7.089085X_4^2 - 3.553151X_5^2 + 1.0225X_4X_5;$$
$$R^2 = 0.96634 \quad \ldots\ldots (13)$$

相當顯然地，新反應曲面方程式具有相當好之解釋能力，其相對飄移指標與反應曲面配湊良好之情形呈現於圖 16 中。爲探討不同模擬風速與噴霧行進速度對於相對飄移指數之影響，不同模擬風速與噴霧行進速度下，逆、順風作業相對飄移指數之等高線圖示於圖 17 與圖 18，圖中水平軸係對應模擬風速之標準化變數 X4，其標示值-1.5 至 1.5 係對應 1 至 7 m/s 之模擬風速，而垂直軸係對應噴霧行進速度之標準化變數 X5，其標示值-1.5 至 1.5 係對應 0.45 至 1.35 m/s 之行進速度。圖 17 顯示逆風噴霧作業以一定行進速度進行噴霧時，相對飄移指數隨模擬風速之增加而增加，而對固定模擬風速而言，以愈大行進速度進行噴霧之相對飄移指數愈大，其乃因風速與噴霧行進速度間區域相對速度愈大，飄移潛勢愈大，而相對飄移指數自然也愈大。同樣地，「區域相對速度愈大，飄移潛勢愈大」也可解釋順風作業相對飄移指數之變化情形，如圖 18 所示順風噴霧作業以一定行進速度進行噴霧時，相對飄移指數亦

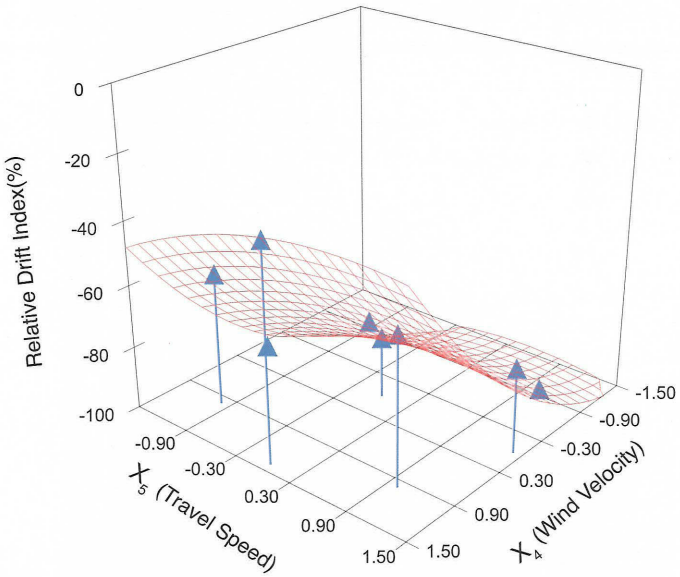


圖 16. 捨棄例外情形後逆風噴霧作業不同模擬風速及噴霧行進速度下相對飄移指數之散佈與新反應曲面。

Fig. 16. The scatter and response surface of relative drift indexes for droplets released at various wind velocities and travel speeds for upwind spraying without the extreme case.

隨模擬風速之增加而增加，而對固定模擬風速而言，以愈小行進速度進行噴霧之相對飄移指數則愈大。

結論與建議

一、氣流與噴嘴間夾角之大小對於氣輔噴霧之霧粒飄移不具明顯趨勢之影響。

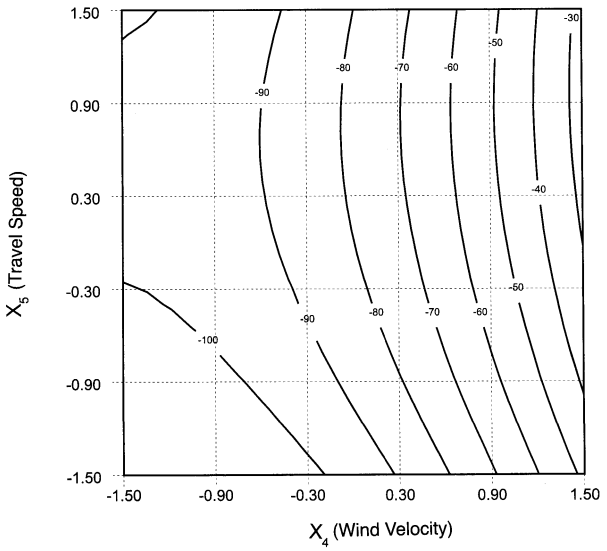


圖17. 逆風噴霧作業不同模擬風速及噴霧行進速度下相對飄移指數之等高線圖。

Fig. 17. Relative drift index contours for droplets released at various wind velocities and travel speeds for upwind spraying.

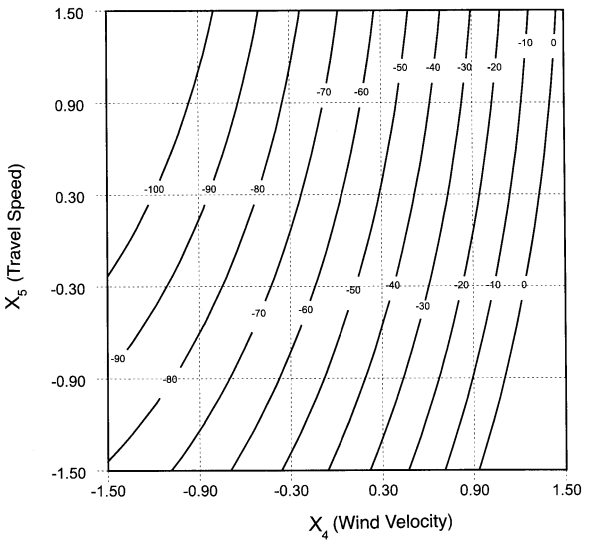


圖18. 順風噴霧作業不同模擬風速及噴霧行進速度下相對飄移指數之等高線圖。

Fig. 18. Relative drift index contours for droplets released at various wind velocities and travel speeds for downwind spraying.

二、逆風噴霧作業時具較佳噴霧飄移減低效果之部份顯示，具較大氣流速度及較大氣囊與噴嘴組角度可有較佳噴霧飄移減低效果，且使用逆風之輔助氣流比順風之輔助氣流具有較佳之噴霧飄移減低效果。

三、順風噴霧作業時，具較大氣流速度可有較佳噴霧飄移減低效果，且使用逆風之輔助氣流比順風之

輔助氣流佔有較大有利降低噴霧飄移之可能操縱範圍。

四、本研究模擬之氣輔噴霧機基於使用氣流出口寬度 1.5 cm，在輔助氣流慣常使用氣流速度 20 至 30 m/s 之情形下，順風作業時已有應可接受-50% 至-80% 之相對飄移指標，惟在逆風作業時卻只有-5% 至-22% 之相對飄移指標，顯然逆風作業時使用如此氣流速度之飄移減低效果仍然不足，應以適時提高氣流速度而改善之。

五、「區域相對風速愈大，飄移潛勢愈大」可完全解釋順、逆風作業不同模擬風速與噴霧行進速度下相對飄移指數之變化情形。

六、本研究所得之模擬成果可提供指引氣輔噴霧實際操作所需之參考資料，不僅有效縮短傳統試誤途徑之試驗時程，且可使氣輔噴霧機械之實際修改製造有所依循，更可使氣輔噴霧之本土新技術發揮最佳之本能功效，其與氣輔噴霧之實際應用是否相符未來仍需田間試驗驗證之。

誌　謝

本研究承蒙行政院國家科學委員會 NSC88-2313-B-055-013 專題研究計畫補助經費，始得以完成，謹此誌謝。

引用文獻

1. 張國輝，劉達修，蔡致榮，邱銀珍。1992。研習自動化病蟲害防治技術。行政院農業委員會農漁牧產業自動化八十一年度人才培育計畫出國研習報告。
2. 蔡致榮與 H. E. 0zkan。1997。噴霧屏蔽行進中性能之模擬。中華農業研究 46(4)：388~406。
3. 蔡致榮與 H. E. 0zkan。1998。氣流屏蔽式施藥系統之設計評估。中華農業研究 47(1)：71~94。
4. Cooke, B. K., E. C. Hislop, P. J. Herrington, N. M. Western and F. Humpherson-Jones. 1990. Air-assisted spraying of arable crops, in relation to deposition, drift and pesticide performance. Crop Protection 9: 303-311
5. Derksen, R. C. 1994. Air-assisted sprayer evaluations for potato pest control. ASAE Paper No. 94-1506, ASAE, St. Joseph, MI 49085.
6. FLUENT Incorporated. 1995. FLUENT user's guide. Version 4.3 Fluent Incorporated, Centerra Resource Park, 10 Cavendish Court, Lebanon, NH 03766.
7. Grinstein, A., H. Frankel, M. Austerweil and G. Kritzman. 1988. Air-assisted placement spraying for Stemphylium control in seed onions. Crop Protection 7: 356-360.
8. Hislop, E. C. 1991. Air-assisted crop spraying: an introductory review, pp 3-14. In: A. Lavers, P. Herrington and E. S. E. Southcombe eds. BCPC MONO No. 46 Air-assisted spraying in crop protection. The Lavenham Press Limited, Lavenham, Suffolk, UK.
9. Hislop, E. C., N. M. Western, B. K. Cooke and R. Bulter. 1993. Experimental air-assisted spraying of young cereal plants under controlled conditions. Crop Protection 12: 193-200.
10. Hobson, P. A., P. C. H. Miller, P. J. Walklate, C. R. Tuck. 1993. Spray drift from hydraulic spray nozzles: the use of a computer simulation model to examine factors influencing drift. Journal of Agricultural Engineering Research 54(2): 293-305.
11. Howard, K. D., J. E. Mulrooney and L. D. Gaultney. 1994. Penetration and deposition of air-assisted sprayers. ASAE Paper No. 94-1024, ASAE, St. Joseph, MI 49085.
12. Howard, K. D. and J. E. Mulrooney. 1995. Testing protocol for the evaluation of air-assisted boom sprayers. ASAE Paper No. AETC 96-116, ASAE, St. Joseph, MI 49085.
13. Manor, G., A. Hofner, R. Or, G. Phishler, Y. Epstein, T. Nakash and M. Jacobi. 1989. Air stream facilitated application of cotton foliage treatments. Transactions of the ASAE 32(1): 37-40.
14. May, M. J. 1991. Early studies on spray drift, deposit manipulation and weed control in sugar beet with two air-assisted boom sprayers, pp 89-96. In: A. Lavers, P. Herrington and E. S. E. Southcombe eds. BCPC MONO No. 46 Air-assisted

spraying in crop protection. The Lavenham Press Limited, Lavenham, Suffolk, UK.

15. Panneton, B., H. Philion and R. Theriault. 1996. Spray chamber evaluation of air assisted spraying. ASAE Paper No. 96-1078, ASAE, St. Joseph, MI 49085.
16. Pompe, J. C. A. M. and H. J. Holterman. 1992. Technical aspects of pesticide application. Wageningen Agricultural University, Agrotechnion Bomenweg 4 6703 HD, Wageningen, The Netherlands.
17. Quanquin, B. J. 1992. Less drift, more on target with the twin system. ASAE Paper No. 92-1564, ASAE, St. Joseph, MI 49085.
18. Quanquin, B. J. 1995. Air-assist applied to field sprayers. Proceedings of National Conference on Pesticide Application Technology, University of Guelph, Guelph, Ontario, Canada. pp 124-126.
19. Reichard, D. L., H. Zhu, R. D. Fox and R. D. Brazee. 1992a. Wind tunnel evaluation of a computer program to model spray drift. Transactions of the ASAE 35(3): 755-758.
20. Reichard, D. L., H. Zhu, R. D. Fox and R. D. Brazee. 1992b. Computer simulation of variables that influence spray drift. Transactions of the ASAE 35(5): 1401-1407.
21. Taylor, W. A. and P. G. Andersen. 1989. The use of air assistance in field crop sprayer to reduce drift and modify drop trajectories. Proceedings of Brighton Crop Protection Conference- Weeds 2, 631-639.
22. Walklate, P. J., K. L. Weiner and C. S. Parkin. 1993. Computational fluid dynamics: a tool for evaluating air assistance sprayer design concepts. ANPP- BCPC - Second International Symposium on Pesticides Application Techniques pp 101-108.
23. Watson, D. G. and R. L. Wolff. 1985. Air carrier technique for row crop spraying application. Transactions of the ASAE 28(5): 1445-1448.
24. Weiner, K. L. and C. S. Parkin. 1993. The use of computational fluid dynamic code for modeling spray from a mistblower. Journal of Agricultural Engineering Research 55: 313-324.
25. Womac, A. R., J. E. Mulrooney and W. P. Scott. 1992. Characteristics of air-assisted and drop-nozzle sprays in cotton. Transactions of the ASAE 35(5): 1369-1376.
26. Young, B. W. 1991. A method for assessing the drift potential of hydraulic nozzle spray clouds, and the effect of air assistance, pp 77-86. In: A. Lavers, P. Herrington and E. S. E. Southcombe eds. BCPC MONO No. 46 Air-assisted spraying in crop protection. The Lavenham Press Limited, Lavenham, Suffolk, UK.
27. Zhu, H., D. L. Reichard, R. D. Fox, R. D. Brazee and H. E. Ozkan. 1994. Simulation of drift of discrete sizes of water droplets from field sprayers. Transactions of the ASAE 37(5): 1401-1407.

Evaluation of Air-assisted Spraying System by Simulation[1]

Jyh-Rong Tsay, Lien-Sheng Liang and Lung-Hu Lu[2]

Summary

Air-assisted spraying has been among the strategies recommended for reducing spray drift. Even though many studies pertaining to air-assisted spraying had shown its advantages on reducing spray drift, little information about optimal operating parameters and the effect of wind velocity, sprayer travel speed, and sprayer travel direction on reducing spray drift for air-assisted spraying was available. In this study, the evaluation of air-assisted spraying system based on comparing effects on drift reduction was conducted by using a computational fluid dynamics software FLUENT® and a response surface method. The relative drift indexes of air-assisted spraying under various wind velocities, sprayer travel speeds, and sprayer travel directions were also investigated. Main conclusions drawn from this study were stated as follows. The angle between the air jet and nozzle of air-assisted spraying has no significant influence on reducing spray drift. With relative drift indexes from -50% to -80%, the air current with velocities from 20 to 30 m/s, commonly used by air-assisted spraying, seems to be acceptable in reducing spray drift for downwind spraying. However, with relative drift indexes from -5% to -22%, the air current with velocities from 20 to 30 m/s of air-assisted spraying needs to be increased properly to improve the ability of drift reduction. Variations of relative drift indexes of air-assisted spraying under various wind velocities, sprayer travel speeds, and sprayer travel directions could be explained by local relative wind velocity. The higher the local relative wind velocity, the greater the relative drift index. Results of this study provide the practical operations of air-assisted spraying with useful information, which is beneficial for reducing spray drift from air-assisted sprayers.

Key words : Air-assisted spraying, Evaluation, Simulation.

---

1. Constribution No. 2026 from Taiwan Agricultural Research Institute, Council of Agriculture.

2. Respectively, Associate Researcher, Senior Engineer and Head, and Assistant Researcher, Department of Agricultural Engineering, TARI, Wufeng, Taichung, Taiwan, ROC.