不同鳥害防制法對小米生產之影響

張芳魁[1]

[1]農業部臺東區農業改良場作物改良科　助理研究員

摘　要

小米(*Setaria italica* (L.) Beauv.)生產過程，鳥害常造成產量嚴重損失，傳統人工趕鳥方式耗時費力，且效果有限。本研究比較兩種鳥害防制措施，超音波驅鳥器與防鳥網對小米產量、品質之影響及成本效益。試驗結果顯示，無任何防制的田區鳥害損失率達61.8%；防鳥網試區損失率為0%、超音波驅鳥器試區損失率為14.6%。防鳥網區的小米雜色粒比率(34.35%)顯著高於超音波驅鳥器區(14.25%)，推測其品質下降可能與病蟲害增加有關，而微氣候改變與鳥類活動減少可能是影響病蟲害的重要原因。防鳥網內部的光度與風速分別為露地的74.6%及75.8%。成本效益分析顯示，兩種方法在中大面積生產均具正向效益，且使用次數越多，攤提後之單次成本越低，效益隨之提升。在0.1公頃小面積生產中，超音波驅鳥器因固定成本較高可能導致淨效益為負，防鳥網相對較具優勢。

關鍵詞：小米、鳥害防制、防鳥網、超音波驅鳥器、成本效益

一、前言

小米(*Setaria italica* (L.) Beauv.)為臺灣原住民族重要的傳統作物，不僅是糧食來源，更深具文化意涵。近年來隨著人口老化與農業勞動力不足，小米生產面臨嚴峻挑戰，生產過程尤以鳥害問題最為嚴重[1,2,9]。小米抽穗期至成熟期這段時間，鳥類群聚覓食常造成田區穗粒大量損失，直接影響農民收成與部落歲時祭儀的糧源。事實上，不同農作物在世界各地區亦面臨相同的鳥害困境[7,12,13]。傳統上，農民多依靠人工趕鳥，如敲打聲響或巡田驅趕，然而這些方式耗費龐大勞力與時間，防範效果又有

限[5]。因此如何穩定生產、減緩鳥害，同時降低勞力付出，成為小米栽培重要的課題。

臺東農改場目前推廣的防制策略為架設防鳥網[4]，透過防鳥網阻隔避免鳥類進入田區，防制效果穩定且直接；然由於架設成本與人力需求高，大面積推廣困難，導致使用意願降低。另一種防制方法是使用市售的超音波驅鳥器，利用特定頻率的聲波干擾鳥類活動，以達到驅趕的效果，然而聲波驅鳥的有效性受鳥的種類、適應性與田間條件影響，實際的應用成效仍有待驗證[6,8,10,11]。本文旨在比較防鳥網設施與超音波驅鳥器兩種防鳥方法在小米生產上的差異，評估其減少鳥害損失與降低勞力投入之成效，以提供未來小米栽培鳥害管理策略之參考。

二、材料與方法

(一)試驗地點：臺東區農業改良場豐里試驗地。

(二)試驗材料：小米臺東7號。

(三)試驗場域建置：2025年2月20日以單行式播種機播種，行距50公分。兩處理田區對角相鄰，相距15公尺，種植面積皆為756平方公尺(36m×21m)。

圖1. 以超音波驅鳥器防制小米鳥害
Fig. 1. Millet bird damage control using ultrasonic bird repellers.

(四)試驗處理：

A處理：使用超音波驅鳥器(迪菲循飛航科技股份有限公司)防制鳥害。於抽穗期前設置驅鳥設備，以太陽能供電，安裝於田區4個角，全天候向內朝對角線方向發射超音波(圖1)，聲音頻率超過20,000赫茲(Hz)，從抽穗期至採收期持續對田區內鳥類進行干擾。

B處理：架設防鳥網防制鳥害。於抽穗期前架設防鳥網設施(圖2)，完全覆蓋試驗田區。

C處理：對照處理，於B處理田區保留四分之一面積不覆蓋防鳥網，且無任何驅鳥設施(圖3)。

圖2. 以防鳥網防制小米鳥害
Fig. 2. Millet bird damage control using bird-exclusion nets.

圖3. 無任何防制措施之小米對照處理田區
Fig. 3. The millet field without any bird damage control measures.

(五)調查項目：

1. 果穗受害率：調查各處理採收前1週，小米果穗遭受鳥害的比率。受害率(%)＝(受害株數/調查株數)×100%。取樣10小區(n=10)，每小區調查10株。
2. 果穗受害程度：調查各處理採收前1週，小米果穗遭受鳥害籽粒減少的程度。受害程度(%)＝1-(各處理單穗籽粒重/未受害單穗籽粒重)×100%。取樣3小區(n=3)，每小區調查5株，每株的穗長介於15～20公分。
3. 風速：防鳥網搭設期間，使用風速計(FUNET，FM-950)不定時測量防鳥網內部與外部的最大風速。
4. 光度：防鳥網搭設期間，使用光度計(LX-1102)測量不同時段晴朗狀況下防鳥網內部與外部的光度。
5. 籽實品質：量測防鳥網區與超音波驅鳥器區帶殼籽實的千粒重及色澤，脫殼籽實的雜色粒比率。色澤以色差計(Nippon Denshoku，NR-12)量測。
6. 官能品評：取防鳥網區與超音波驅鳥器區脫殼籽實各100 g，小米與水1：2(重量比)，以電子鍋白米模式烹煮，針對氣味、味道、

口感進行品評，主觀描述兩者之差異。

7. 成本效益分析：計算各防鳥措施不同條件下的淨效益與相對效益。淨效益$_{處理}$＝產量$_{理論}$×(1－減產率$_{處理}$)×價格－成本。相對效益＝淨效益$_{有防制處理}$－淨效益$_{無防制}$。淨效益代表單位面積的實際收益；相對效益則是與基準(對照組)相比，顯示投資是否比不投資划算，若相對效益＞0，代表使用該措施效益比不防制的效益高；若相對效益<0，則代表該措施效益比不防制差。

三、結果與討論

(一)不同鳥害防制方法對小米產量之影響

各處理小米鳥害情形如表1，A～C處理受害率分別為49%、0%及96%，表示超音波驅鳥器處理100株小米有49株遭受鳥害；架設防鳥網處理沒有任何小米穗遭受鳥害；對照處理100株小米有96株遭受鳥害。受害程度方面，A處理29.8%，B處理0%，C處理64.4%，顯示使用超音波驅鳥器(A)者，遭受鳥害的小米穗籽粒減少29.8%；搭設防鳥網(B)者，小米穗沒有籽粒減少；對照組(C)無任何防鳥措施者，遭受鳥害的小米穗籽粒減少64.4%。以「受害率×受害程度」作為估算產量減損方式，結果顯示對照組產量減少61.8%，超音波驅鳥器損失產量14.6%，防鳥網區產量減少0%。同樣暴露在鳥類可啄食的環境，超音波驅鳥器比對照組減少47.2%的產量損失，顯示超音波驅鳥器有一定程度防制鳥害的效果，但無法完全防止鳥害，相較之下，防鳥網能有效隔絕鳥類進入田區，可完全防制小米鳥害並維持產量。

表1. 不同鳥害防制方法之小米受害情形
Table 1. Damage incidence of foxtail millet under different bird control methods.

處理項目	果穗受害率 (%)	果穗受害程度 (%)	減產率(%) (果穗受害率×受害程度)
A.超音波驅鳥器	49.0±31.8 b^{z}	29.8±12.7 b	14.6
B.防鳥網	0.0±0.0 c	0.0±0.0 c	0
C.對照組	96.0±5.2 a	64.4±5.5 a	61.8

^{z} Mean ± SD. Means within each column followed by the same letter are not significantly different at 5% level by t-test.

田間觀察到的鳥害主要是麻雀啄食造成的，成群的麻雀飛入田區，停在穗梗上覓食，最先受害的部位是穗的基部，一步一步吃到末端。下垂的果穗會隨著鳥的停留上下擺動，越末端、越靠內側，越不容易被鳥啄食。以肉眼觀察，超音波驅鳥器區的受害部位主要在果穗的基部(圖4)，而對照組的受害部位大多數是全果穗(圖6)，即從基部到末端都遭受危害，兩者有明顯程度上的差別。防鳥網則是沒有遭受危害，果穗完好(圖5)。

圖4. 以超音波驅鳥器防制鳥害之小米穗

Fig. 4. Millet panicles protected by ultrasonic bird repellers.

圖5. 以防鳥網防制鳥害之小米穗

Fig. 5. Millet panicles protected by bird-exclusion nets.

圖6. 無任何措施防制鳥害之小米穗

Fig. 6. Millet panicles exposed to bird damage without control measures.

超音波驅鳥器並非以威嚇方式驅趕鳥類，即使全天候發出超音波，仍然觀察到鳥類自由進出田區。超音波驅鳥器主要是營造一個鳥類不喜歡的環境，利用超過20,000Hz的特定音頻(人耳聽不見)干擾鳥類，減少牠們造訪的次數，縮短停留覓食的時間，以此達到減少鳥害的作用。驅鳥器的效果會受到設備數量與發射方位的影響，預備試驗時只使用1個驅鳥器，小米受損率竟達100%，每一穗都有被啄食的情形，受害程度52%～89%，平均70%，與本次試驗對照組結果相似。本試驗則使用四個驅鳥器，田區內同時有來自四個方向的音頻干擾，其防制效果顯著提升。

(二)不同鳥害防制方法對小米品質之影響

調查防鳥網設施與超音波驅鳥器兩種防鳥方式對小米品質的影響，結果顯示，防鳥網區的小米千粒重為1.755 g，超音波驅鳥器區(防鳥網外)的小米千粒重為1.670 g，防鳥網區的小米籽粒重顯著高於網外的小米(表2)。籽實含水率分別為9.92%與10.31%，無顯著差異。以肉眼觀察帶殼籽粒的色澤，臺東7號小米為橘紅色，超音波驅鳥器區的小米顏色較防鳥網區小米鮮艷(圖7)。色差計測量結果亦顯示，超音波驅鳥器區小米C*值(飽和度) 43.12高於防鳥網區小米37.69；超音波驅鳥器區小米a*值(紅綠值) 20.93比防鳥網區小米16.55高，所以

表2. 不同鳥害防制方法對小米品質之影響
Table 2. Grain quality of foxtail millet under different bird control methods.

處理	千粒重 (g)	含水率 (%)	雜色粒比率 (%)	L*	a*	b*	C*	H°
防鳥網區	1.755	9.92	34.35	45.16	16.55	33.86	37.69	63.95
超音波驅鳥器區 (防鳥網外)	1.670	10.31	14.25	44.72	20.93	37.70	43.12	60.95
差異顯著性 [z]	**	ns	**	ns	**	ns	*	**

[z]平均值(n=3)差異達$p<0.05$、$p<0.01$顯著水準以*、**表示，ns表示不顯著。(t-檢定)

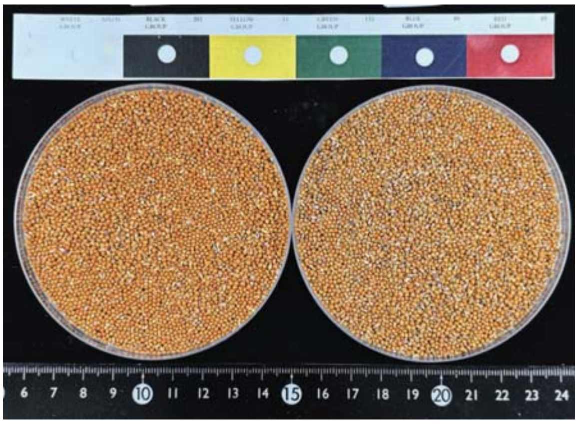

圖7. 超音波驅鳥器區(左)與防鳥網區(右)之帶殼小米色澤

Fig. 7. Color of husked foxtail millet in the ultrasonic bird-repeller plot (left) and the bird-exclusion net plot (right).

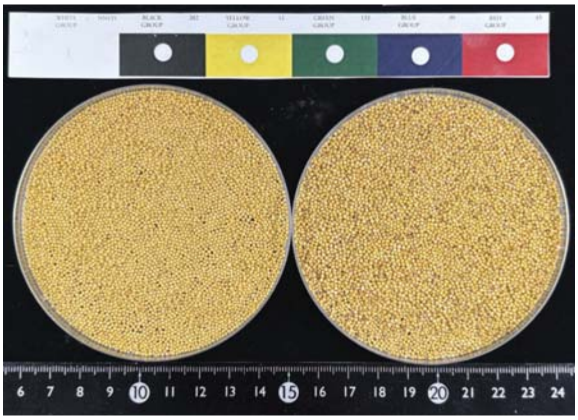

圖8. 超音波驅鳥器區(左)與防鳥網區(右)之脫殼小米色澤

Fig. 8. Color of dehulled foxtail millet in the ultrasonic bird-repeller plot (left) and the bird-exclusion net plot (right).

更偏紅。小米脫殼後，防鳥網區小米雜色粒的比率34.35%顯著高於超音波驅鳥器區小米14.25%(圖8)，顯示防鳥網區的小米帶有褐斑或褐化的比率較高(圖9)，品質較差。小米帶有褐斑及褐化情形是果穗遭受椿象類危害的典型徵狀[3]，推測蟲害的增加與防鳥網內沒有鳥類活動有密切的關係。作物栽培過程，鳥類與害蟲存在複雜的交互作用[14]，未來可進一步研究防制鳥類對田間病蟲害發生的影響。

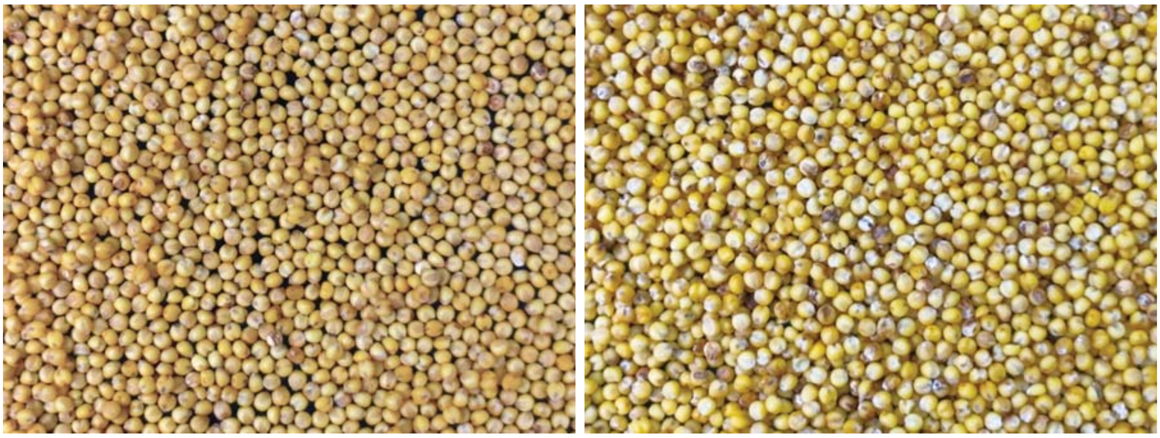

圖9. 防鳥網區(右)的小米雜色粒比率高於超音波驅鳥器區(左)

Fig. 9. The proportion of discolored foxtail millet grains was higher in the bird-exclusion net plot (right) than in the ultrasonic bird-repeller plot (left).

烹煮後的小米品評結果如表3。超音波驅鳥器區(防鳥網外)的小米氣味比防鳥網區的淡，但比較香純，防鳥網區的小米稍微帶有混雜的氣味；味道方面，防鳥網區的小米吃起來會有淡淡的苦味，超音波驅鳥器區的小米則苦味不明顯，且會回甘；口感方面，兩者咀嚼皆有顆粒感，防鳥網區小米感受較明顯，顆粒之間較蓬鬆，超音波驅鳥器區小米則相對較黏稠。小米味道變差與椿象類等病蟲害危害、雜色粒增加有其關連性，推測小米遭受病蟲害，因產生癒傷組織或反應逆境，籽粒二次代謝產物增加，進而增加苦味及混雜的氣味。生產過程，脫殼小米可利用色澤選別機汰除顏色異常、品質較差的籽粒，確保產品品質；若無法色選，雜色粒比例過高，除了外觀品質較差，消費者也會吃不到最理想的小米味道與口感。

表3. 不同鳥害防制方法之小米烹煮後官能品評意見[z]

Table 3. Sensory evaluation of cooked foxtail under different bird control methods.

栽培場域	氣味	味道	口感
防鳥網區	氣味較濃，稍微有雜味	有淡淡苦味，不回甘	顆粒感較明顯，較蓬鬆
超音波驅鳥器區(防鳥網外)	氣味較淡，較香、好聞	較無苦味，會回甘	有顆粒感，較黏稠

[z]以電子鍋白米模式烹煮，小米與水1：2(w：w)，綜合6人品評意見。

針對防鳥網內部與外部測得的最大風速進行回歸分析(Y為網內，X為網外)，兩者呈直線回歸(圖10)，其斜率為0.758，表示不論風速大小，防鳥網的透風率不變，約75.8%。針對防鳥網內部與外部測得的光度進行回歸分析(Y為網內，X為網外)，兩者同樣呈直線回歸(圖11)，其斜率為0.746，表示不論光度大小，防鳥網的透光率不變，約74.6%。本試驗測得網內光度與風速約為網外的74～76%，顯示防鳥網改變田間的微氣候，這些變化可能影響植物生長及病蟲害動態，進而改變穀物的外觀與感官品質。本研究推測防鳥網內小米籽粒褐化與椿象類危害增加有關，而鳥類活動減少與風速、光度降低可能是椿象類活動增加的重要影響因子。由於本試驗栽培過程未進行任何病蟲害防治工作，導致小米成熟期受椿象類等病蟲害危害情形更為明顯，而相較之下，防鳥網內的小米危害風險是高於防鳥網之外，顯示架設防鳥網應更加注意病蟲害防治，避免因病蟲害增加而造成籽粒品質下降。

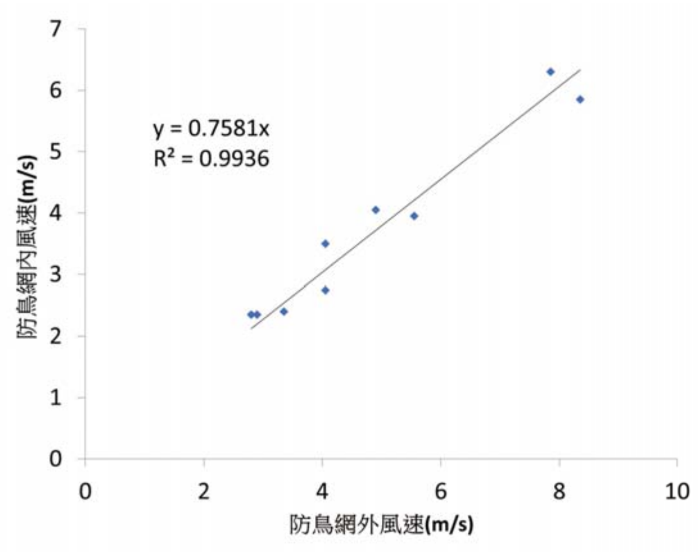

圖10. 防鳥網內、外風速之回歸線圖

Fig. 10. Regression plot of wind speed inside and outside the bird-exclusion net.

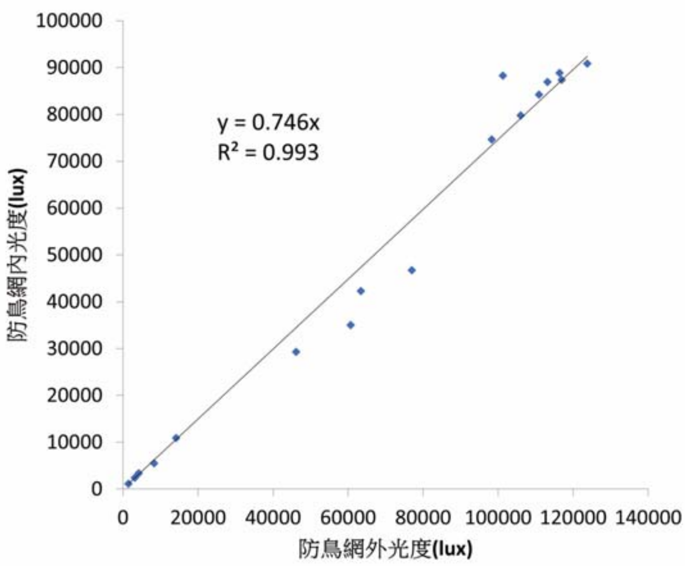

圖11. 防鳥網內、外光度之回歸線圖
Fig. 11. Regression plot of light intensity inside and outside the bird-exclusion net.

(三)設備操作與成本效益分析

本試驗使用市售的防鳥網，材質為PE，黑色、無結，網目大小1.5公分×1.5公分(圖12)；網繩是由多股塑膠細線交織成束，編織呈六角形的網目，每束網繩1 mm粗，交會處為2 mm粗。此材料能有效阻擋鳥類進入田區，尤其是體型較小的麻雀；且不會傷害鳥類，試驗過程未曾發生鳥類纏繞死亡的情形。搭設防鳥網係以粗竹竿為支柱，地面長度約200公分，間距4公尺，周邊支柱以棉繩向外固定增加強度，支柱頂端套上管帽，以棉繩縱向橫向依序串連每一支柱，並拉緊固定，最後再覆蓋防鳥網。若不計人力成本，防鳥網設施約每0.1公頃30,000元，可重複使用。若大面積栽培，防鳥網必須分區覆蓋，同時需要大量的人力才能完成搭設，因此在人力有限的情況下，防鳥網設施比較適合小面積栽培者使用。

超音波驅鳥器若以太陽能供電，需搭配太陽能板、控制器、蓄電池等材料，一個田區4個驅鳥器、2個太陽能板、2個控制器及4個蓄電池，花費約75,000元，同樣可重複使用。1人即可搭設完成，人力需求不高。該設備聲波有效距離為150公尺，因此應用面積可達1公頃(小於1公頃，固定成本75,000元)，面積越大，單位成本越低，比較適合大面積栽培者使用。

圖12. 防鳥網網目大小與網繩樣態
Fig. 12. Mesh size and structure of bird-exclusion nets.

以本試驗產量減損的結果(無防制61.8%、超音波驅鳥器14.6%、防鳥網0 %)分析各處理在不同情境下之成本效益，假設農友自行販售脫殼小米(相對高價情境)，以產量每公頃1,200公斤(脫殼籽實)，售價每公斤700元來計算，攤提5次，防鳥網每0.1公頃收益比無防制多45,912元，超音波驅鳥器每0.1公頃收益比無防制多24,648元。不論小面積(0.1公頃)或大面積(1.0公頃)，防鳥網的收益皆高於超音波驅鳥器(表4；圖13)，淨效益隨著生產面積增加而提高。攤提次數越多，每期成本越低，淨效益亦越高。防鳥網與超音波驅鳥器0.1公頃的收益差距為21,264元，若搭設防鳥網的人力成本高於21,264元，則收益變成超音波驅鳥器較佳；反之，若搭設的人力成本少於21,264元，則仍以防鳥網較具優勢。

假設農友採收脫粒後賣給收購商(相對低價情境)，以產量每公頃1,700公斤(帶殼籽實)，售價每公斤160元來計算，攤提5次，若只生產0.1公頃，超音波驅鳥器實際收益比沒有防制還差(相對效益為負值)，至少需生產0.2公頃，收益才高過無防制(表5；圖14)；淨效益隨著生產面積增加而提高，超音波驅鳥器與防鳥網增益效益差異不大。同樣攤提次數越多，每期成本越低，淨效益亦越高。超音波驅鳥器與防鳥網兩者收益差異不大，但防鳥網若扣除搭設的人力成本，其收益可能低於超音波驅鳥器。相較之下，超音波驅鳥器反而較具優勢。

表4. 不同鳥害防制方法的成本效益分析[z](脫殼籽實)
Table 4. Cost-benefit analysis of different bird control methods. (selling dehulled millet)

處理	分 5 次攤提				分 10 次攤提			
	0.1 公頃		1.0 公頃		0.1 公頃		1.0 公頃	
	淨效益(元)	相對效益(元)	淨效益(元)	相對效益(元)	淨效益(元)	相對效益(元)	淨效益(元)	相對效益(元)
超音波驅鳥器	56,736	24,648	704,860	383,980	64,236	32,148	709,860	388,980
防鳥網	78,000	45,912	790,000	469,120	81,000	48,912	810,000	489,120
對照(無防制)	32,088	-	320,880	-	32,088	-	320,880	-

[z]農友自行銷售脫殼小米，以產量每公頃1,200公斤，售價每公斤700元計算。

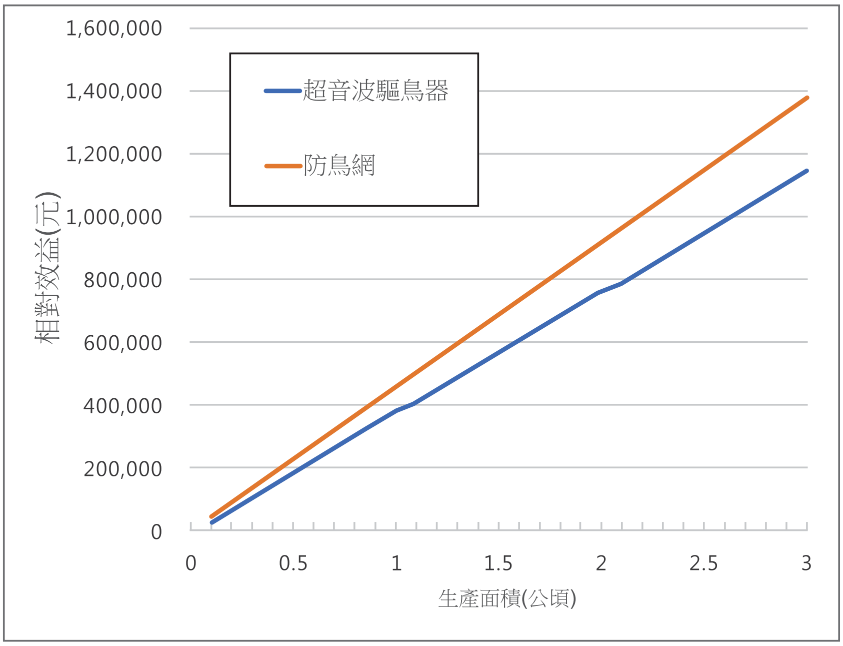

圖13.兩種防鳥方法的「生產面積vs.相對效益」曲線。脫殼籽實產量1,200公斤/公頃、售價700元/公斤、分5次攤提之情境。

Fig. 13.'Production area vs. relative benefit' curves of two bird control methods under the scenario of dehulled grain yield of 1,200 kg/ha, price of NT$700/kg, amortized over five uses.

表5. 不同鳥害防制方法之成本效益分析[z] (帶殼籽實)
Table 5. Cost-benefit analysis of different bird control methods. (selling husked millet)

處理	分 5 次攤提				分 10 次攤提			
	0.1 公頃		1.0 公頃		0.1 公頃		1.0 公頃	
	淨效益 (元)	相對效益 (元)	淨效益 (元)	相對效益 (元)	淨效益 (元)	相對效益 (元)	淨效益 (元)	相對效益 (元)
超音波驅鳥器	8,229	-2,162	217,288	113,384	15,729	5,338	224,788	120,884
防鳥網	21,200	10,810	212,000	108,096	24,200	13,810	242,000	138,096
對照 (無防制)	10,390	-	103,904	-	10,390	-	103,904	-

[z]農友將帶殼籽實賣給收購商，以產量每公頃1,700公斤，售價每公斤160元計算。

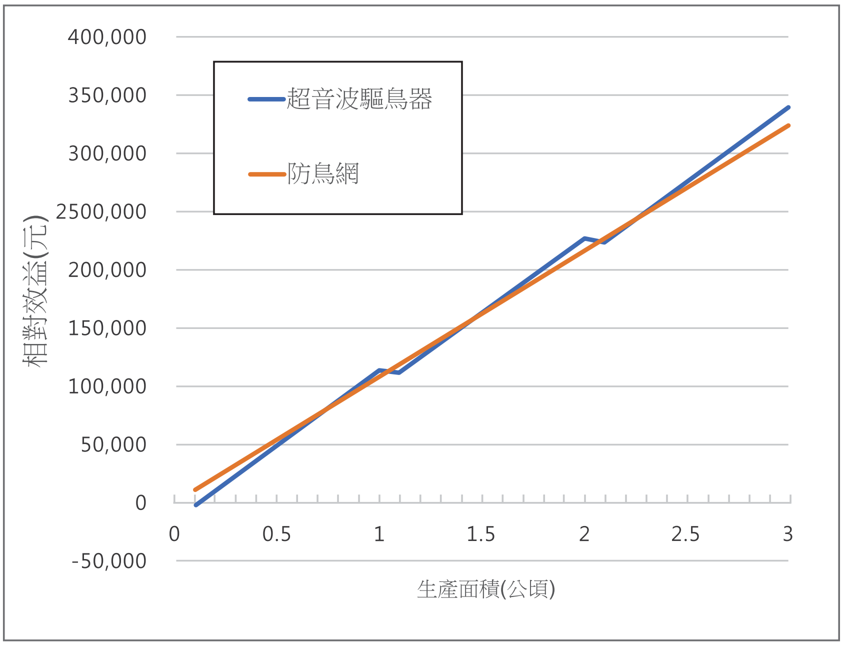

圖14. 兩種防鳥方法的「生產面積vs.相對效益」曲線。帶殼籽實產量1,700公斤/公頃、售價160元/公斤、分5次攤提之情境。

Fig. 14. 'Production area vs. relative benefit' curves of two bird control methods under the scenario of husked grain yield of 1,700 kg / ha, price of NT$160/kg, amortized over five uses.

四、結論

本研究比較超音波驅鳥器與防鳥網對小米生產之影響，結果顯示兩者在防制效果與經濟效益上具有明顯差異。防鳥網能完全避免鳥害，顯著維持產量，但受椿象類等病蟲害危害導致籽粒品質下降的風險增加。相對於無防制，超音波驅鳥器可減少鳥害損失47.2%，不過仍有14.6%產量損失，其防護效果不如防鳥網處理者。在成本效益方面，防鳥網與超音波驅鳥器均可於大面積生產中帶來正向淨效益，且攤提次數越多，每期成本越低，效益越高。防鳥網需額外考量搭設的人力及其成本的增加。而在小面積生產(0.1公頃)情境下，超音波驅鳥器的固定成本過高，可能導致效益為負；而防鳥網能維持一定優勢。若小米以高價(如自行銷售脫殼小米)進入市場，防鳥網相對效益高於超音波；若以低價(如帶殼小米售予收購商)交易，兩者的增益差距縮小，差異不大。

綜上所述，架設防鳥網適用於追求穩定產量的中小規模生產者，惟需特別注意病蟲害發生導致品質下降的問題，應加強田間管理；超音波驅鳥器較適合中大面積生產，且在長期使用、設備成本分攤下，其經濟效益可逐漸提升。農友可依據自身的生產規模與銷售方式決定最佳的鳥害防制策略。

參考文獻

1. 江瑞拱。2003。小米與其栽培管理。臺東區農技專刊第27期。臺東：行政院農業委員會臺東區農業改良場。
2. 李够霞、吴瑞俊、白崗栓。2013。谷子成熟期的鳥害調查及防治方法。農學學報3(5):18-21。
3. 許育慈。2024。小米關鍵病蟲害整合管理模式建立。臺東區農業專訊129：21-25。
4. 張芳魁。2025。本場推廣小米田搭設防鳥網 確保收成並降低損失。臺東區農情月刊304：3。
5. 曾祥恩。2013。以人工驅趕對小米鳥害防制效果之探討。臺東區農業專訊86：10-13。
6. Bomford, M. and P. H. O'Brien. 1990. Sonic deterrents in animal damage control: a review of device tests and effectiveness. Wildl. Soc. Bull. 18：411-422.
7. De Grazio, J. W. 1978. World bird damage problems. Proc. Vertebr. Pest Conf. 8(8)：9-24.
8. Erickson, W. A., R. E. Marsh, and T. P. Salmon. 1992. High frequency sound devices lack efficacy in repelling birds. Proc. 15th Vertebr. Pest Conf. 1992. 103-104.
9. Li, N. 2017. Effect of bird damage on different millet varieties. Agric. Sci. Technol. 18(4):683-686.
10. Meylan, A. 1978. Granivorous birds in sunflower crops. Proc. Vertebr. Pest Conf. 8:73-77.
11. Ogochukwu, E. S., A. D. Okechukwu, and O. G. Nnaegbo. 2012. Construction and testing of ultrasonic bird repeller. J. Nat. Sci. Res. 2(9):8-17.
12. Rivadeneira, P., S. Kross, N. Navarro-Gonzalez, and M. Jay-Russell. 2018. A review of bird deterrents used in agriculture. Proc. 28th Vertebr. Pest

Conf., 218-223.

13. Sausse, C., A. Baux, M. Bertrand, E. Bonnaud, S. Canavelli, A. Destrez, P. E. Klug, L. Olivera, E. Rodriguez, G. Tellechea, and S. Zuil. 2021. Contemporary challenges and opportunities for the management of bird damage at field crop establishment. Crop Protec. 148, 105736.
14. Woronecki, P. P. and R. A. Dolbeer. 1980. The influence of insects in bird damage control. Proc. Vertebr. Pest Conf. 9(9) ： 53-59.

Effects of Different Bird Control Methods on Foxtail Millet (*Setaria italica*) Production

Fang-Kuei Chang[1]

[1]Assistant Researcher of Crop Improvement Department of Taitung DARES, MOA.

Abstract

During foxtail millet (*Setaria italica* (L.) Beauv.) production, bird damage causes severe yield losses, while traditional manual bird-scaring methods are labor-intensive, time-consuming, and of limited effectiveness. This study compared two bird control measures—ultrasonic bird repellers and bird-exclusion nets—in terms of their effects on millet yield, grain quality, and cost-effectiveness. Experimental results showed that bird damage loss without control reached 61.8%, whereas the loss rate was 0% under bird-exclusion nets and 14.6% under ultrasonic bird repellers. The proportion of discolored grains under bird-exclusion nets (34.35%) was significantly higher than that under ultrasonic bird repellers (14.25%), suggesting that the decline in quality was related to the increase in insect pests, possibly influenced by changes in microclimate and reduced bird activity. Light intensity and wind speed inside the nets were 74.6% and 75.8% of those measured outside, respectively. Cost-benefit analysis indicated that both methods provided positive net benefits in medium- to large-scale production, with greater benefits achieved as the number of uses increased and amortized costs per season decreased. However, in small-scale production (0.1 ha), the high fixed cost of ultrasonic repellers could result in negative net returns, whereas bird-exclusion nets presented a relatively greater advantage.

Keywords：Foxtail millet, Bird damage control, Bird-exclusion net, Ultrasonic bird repeller, Cost-benefit analysis