

氣象雷達在候鳥遷徙上的應用

鄧財文¹孫元勳²

中央氣象局墾丁雷達站²

屏東科技大學野生動物保育研究所²

摘要

每年有數十萬的候鳥遷飛經過台灣各地，本文以氣象雷達資料分析 2002-2009 年南遷與北返候鳥在台灣的活動情形，並探討如何以氣象雷達估計鳥群數目。

關鍵詞：氣象雷達、過境模式、候鳥遷徙、台灣

一、前言

從 1940 年代英國證實造成軍方監測雷達上不尋常回波的天使是鳥類後 Buss(1946)，於第二次世界大戰結束雷達便廣泛的被發展用來研究鳥類的遷移 Eastwood(1967)。1950 年代後期，美國的三種氣象雷達系統 WSR-57 和 WSR-74C 對遷徙鳥類的量化研究貢獻良多，是往後三、四十年間被廣泛用來研究鳥類遷移的方法之一 Gauthreaux(1970)。隨後取而代之的都卜勒氣象雷達 WSR-88D 除了解析度更好外，還能更準確的偵測到微弱的反射波如鳥、昆蟲和蝙蝠 Larkin(1984)，提供關於遷移動物的密度、遷移海拔、方向、速度等 Gauthreaux and Belser(1998)，Gauthreaux et al.(1998)，這對於遷移的研究裨益良多。

台灣各地對於遷徙性猛禽南遷與北返的研究與調查已持續多年，但大多為地面資料，蔡乙榮(1996)，李璟泓(2002)，陳世中(2004)，且調查地點以墾丁、八卦山和觀音山為主，陳恩理(2003)，這種調查方式雖然可得知特定點的遷鳥數量與遷移時間，但受人力、物力、時間及地形等種種因素的影響下，對於這些猛禽的飛行行為、遷移路徑以及春秋兩季抵達和離開台灣的地點仍有待進一步的研究。2002 年中央氣象局完成「建立台灣地區都卜勒氣象雷達網計畫」在五分山、七股、墾丁、花蓮共設四座氣象雷達站，台灣全區均為雷達偵測範圍所涵蓋。近年來，經過初步測試得知，墾丁氣象雷達站可運用在赤腹鷹季南遷的過

境行為研究，藍正裕(2003)，包括出海後飛行動態、遷移鷹河長度與寬度等，惟該報告僅針對三日遷移高峰的鷹群進行調查，之後於墾丁國家公園內進行的春季及秋季過境猛禽族群調查，讓我們得以進一步了解赤腹鷹和灰面鵟鷹的過境模式，包括鷹群結構和數量、飛行高度、登陸地點、飛行路徑、飛行速度和方向等資訊，但是雷達死角看不到恆春半島以北的遷移狀態，王誠之、孫元勳(2004；2005)。

截至目前為止，台灣地區對於遷移性猛禽的研究多著重於灰面鵟鷹，其與赤腹鷹的數量是台灣地區約二十種的遷移性猛禽中數量最多的，蔡乙榮等(2003)，這二種猛禽每年約九、十月間大量過境台灣中南部，以恆春半島數量最多，春天由南返北，台灣剛好位於亞洲一系列弧形列島的中點，是每年猛禽南遷北返途中的重要休息處 MuClure(1974)，Ferguson-Lees et al. (2001)。根據目前資料雖可知春返過境八卦山的灰面鵟鷹是台灣數條路線中最大的族群，然而由於調查人數與經驗的不同、觀察地點的位置、高度與能見度等種種限制條件影響下，可合理懷疑過境八卦山區的灰面鵟鷹實際應不只所見到的數量，且整體經台灣本島春返的鷹群數量也應不只地面幾個觀測點(如屏東縣墾丁、高雄縣鳳山水庫、彰化縣八卦山、南投縣埔中)所見到的數量王誠之、孫元勳(2004；2005)。

本研究的目的是在應用中央氣象局七股與墾丁二處氣象雷達站的都卜勒雷達之基本反射回波圖及基本速

度場圖，觀測 2005 年春季灰面鵟鷹進行北返時的過境模式，欲探究的問題包括：一、印證歷年地面調查所推測之西部遷移路線；二、濁水溪口以南是否有出海鵟鷹經過澎湖；三、地面記錄數量最多的八卦山調查點對於監測春季灰面鵟鷹群北返的遺漏情形。

二、材料與方法

(一)氣象雷達站地理位置及設備

本研究的雷達觀測為使用中央氣象局位於台南縣七股鄉鹽埕村的七股雷達氣象站(東經 121°04'09"，北緯 23°08'52"；雷達天線高度距海平面約 30 m)，與位於恆春半島的墾丁雷達站(東經 121°50'50"，北緯 23°54'09"；雷達天線高度距海平面約 40.85 m)。二氣象雷達皆採用德國 SELEX-Gematronik 公司製造之 METEOR 1000S 都卜勒雷達，七股雷達站每 10 分鐘 360°掃描 9 個仰角(0.5°~19°)一次；墾丁雷達站每 8 分鐘 360°掃描 9 個仰角(0.5°~19°)一次，處理後的影像像素(pixel)解析度皆為 1°×1°×250 m。

(二)氣象雷達回波資料處理

本研究檢視墾丁和七股雷達站 2005 年 3 月 10 日~31 日上午 5 時至下午 6 時整之基本原始資料。雷達回波圖與速度場影像圖的掃描方式主要採用最低角度掃描仰角(0.5°)，掃描半徑為 230 km。將所得雷達回波圖配合速度場影像圖來過濾雜訊，找出並追蹤鷹群位置，同時配合墾丁氣象雷達站與彰化八卦山、高雄鳳山水庫二處地面資料，從中擷取單日雷達或地面資料中灰面鵟鷹過境數量超過一千隻的日期作為統計樣本(即 3 月 10、16、17、18、19、22、23、24、25、27 日)，至於當月份其餘 21 日的地面資料鷹群過境數量總和僅約 3000 隻，雷達回波圖上相對應的鷹群數少且無特殊遷徙路徑，不致明顯影響本研究的分析結果。本研究對灰面鵟鷹群的判定標準係根據地面過去調查發現其異於其他鳥類的特有帶狀群聚飛行方式，選擇雷達螢幕上移動目標長度達 1 km 以上的飛行物體，並配合當時的地面資料加以佐證。另通過七股雷達站一帶的鷹群，由雷達站南邊接近的鷹群會慢慢進入雷達的掃描死角而消失於螢幕，一直要等到鷹群飛到雷達站北邊大約 30-50 km 後才會再度出現在螢幕，為避免重覆計算，本研究選擇以雷達站以北的鷹

群進行速度、高度的分析；不過在遷移路線上的分析部份，則將雷達站北邊出現的鷹群視為由南邊過來的個體。為量化本研究鷹群之飛行模式，經雷達回波對以下因子加以定義，藍正裕(2003)。

1. 鷹河規模：當鷹河影像完整出現時(距離雷達站 40-80 km)，測量鷹河的長度和寬度。
2. 飛行速度估算：當鷹河影像完整出現且可前後追蹤時，測量鷹河前後 10 min 的位移距離(cm/min)，再換算成時速(km/hr)。
3. 飛行高度測量：以標準大氣壓下之有效地球半徑(4/3 地球曲率半徑)，應用標準折射時雷達波束距地表的高度公式，計算求出鷹群消失於螢幕前的飛行高度(h)。(Doviak and Zrnic, 1993)

$$h = \sqrt{r^2 + R^2 + 2Rr \sin \theta} - R + H$$

r:目標物與雷達的距離; R:有效地球曲率半徑= 8504 km; θ :雷達最低天線仰角(0.5°); H:雷達天線高度=30 m(七股氣象雷達站)

(三)地面資料

2005 年春季灰面鵟鷹北返過境彰化縣八卦山、南投縣埔中和高雄縣鳳山水庫等 3 處地面資料參考台灣猛禽研究會網頁(<http://www.raptor.org.tw>)收集的當地野鳥學會調查記錄。

(四)資料統計與分析

本研究將飛行路線分為海線、平原線和山線(中央山脈西緣)，以了解灰面鵟鷹於台灣本島中南部的過境路線，並探討既有之地面觀測點對於春返鷹群的掌握情形。資料分析部份，以 SPSS 8.0 中文版統計軟體進行 Mann-Whitney U test，比較鷹群於陸域和海面的飛行高度與時速及平原線和山線的飛行高度與時速，顯著水準定在 0.05。

三、結果

(一)鷹河規模

由七股雷達判讀 98 個灰面鵟鷹群，扣除雷達以北可能重覆計算之鷹群後，鷹河長度介於 1.275~15.3 km (n=64)，平均為 4.93 ± 3.09 km；寬度介於 0.425~4.675 km，平均為 2.23 ± 1.09 km。

(二)飛行路線

本研究分析的灰面鵟鷹群中(n=98)，多數係沿著本島陸地北返，其中 55 (61.80 %)個鷹群飛行路線沿著嘉南平原，回波量(20216.7 dBZ)約佔 49.89 %；28 (31.46 %)個鷹群飛行路線為山線，回波量(17540 dBZ)約佔 43.29 %，在陸域遷徙的這些鷹群中，通過八卦山賞鷹點 10 km 半徑內的鷹群回波量為 13436，僅佔總回波值的 33.16 %；採取海線飛行路線的只有 6 (6.74 %)個鷹群，牠們由台灣西南海域朝西北方向前進，回波量(2546.4 dBZ)約佔 6.28 %。

以陸地飛行路線而言(圖 1)，3 月 10 日係墾丁雷達站觀測到 2005 年灰面鵟鷹數量較大量的第一天，該日自早上 11 點整起鷹群陸續抵達恆春半島，七股雷達接手觀測顯示，13 點 07 分鷹群開始出現於屏東縣泰武鄉平和和武潭村一帶上空並朝北北西方飛行，經過高雄縣旗山和六龜間山區，在濁水溪一帶脫離雷達死角後北飛往八卦山區。3 月 16 日，5 點 38 分七股雷達掃瞄到鷹群在屏東縣春日鄉起鷹，6~8 點間經過鳳山水庫、路竹和旗山間陸地，脫離雷達死角後，部份經雲林縣土庫北上，多數經嘉義縣中埔和八卦山，並持續北飛。3 月 17 日，一部份鷹群在 9 點 40 分起循著 10 日的山區飛行路線遷移，但是大多數鷹群在 6 點 30 分和 10 點 20 分間出現在鳳山水庫和柴山並向北飛行，經葉巢和崗山間鄉鎮，隨後在 12 點至 14 點 20 分依序經過雲林縣褒忠和南投縣集集間陸地(含八卦山)。3 月 18 日，6 點 04 分有鷹群在春日鄉土文村附近山區起鷹，而在更南邊夜棲的鷹隻則陸續通過該地，直至 9 點 14 分前方止，北返路線和 10 日類似，但是部份鷹群飛往八卦山以東的集集鎮。此外，在墾丁雷達觀測到單日鷹群過境數量最多的 3 月 22 日，10 點 02 分~17 點 22 分間鷹群陸續飛抵恆春半島陸地和西邊外海，由七股雷達接手觀測發現，12 點 07 分鷹群開始出現於屏東縣春日鄉力里村上空並朝北續行，途中經過來義鄉丹林村、泰武鄉平和村和武潭村、山地門鄉口社村、高雄縣茂林鄉茂林村，接著朝北北西飛過六龜、台南縣玉井，進入雷達死角後再經由嘉義縣中埔村一帶，往北或東北方飛往彰化縣八卦山和南投縣日月潭之間的山區。

海線遷徙方面(圖 1)，3 月 16 日 16 點 50 分有 3 群鷹由林園和柴山間出海朝西北飛行，隔日 6 點 10

分在澎湖七美起鷹續往西北飛行。另鷹群數量最多的 3 月 22 日當天，最早抵達(9 點 54 分)恆春西邊外海約 50 km 的一個鷹群(長度約 15 km)，順著東南風朝西北飛行(王誠之、孫元勳，2005)，七股雷達接手發現 10 點 47 分它已在小琉球西邊約 55 km 海面上，接著遇上西南風，在高雄市外海約 25 km 處轉朝北向行進，直到嘉義布袋外海才又朝西北向，側著風通過澎湖上空繼續其行程。

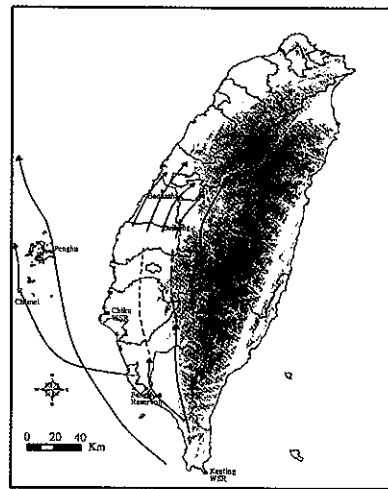


圖 1、2005 年灰面鵟鷹於台灣中、南部遷徙路線圖。實線為雷達圖上觀測到的遷徙路線；虛線為雷達死角內推測的遷徙路線。

(三) 飛行高度

本季七股雷達中所估算的灰面鵟鷹群飛行高度介於 104.49~762.14m，大部份鷹群(25.60 %)飛行高度集中在 300~400 m(圖 2)，平均為 406.81 ± 141.24 m (n=82)，其中以山線遷徙的鷹群的飛行高度(494.32 ± 134.87 m, n=33)顯著高於以平原線遷徙的鷹群(363.57 ± 100.42 m, n=43) (Mann-Whitney U test, $p=0.001$)。

(四) 飛行速度

七股雷達中所估算之灰面鵟鷹群北返飛行時速介於 11.424~85.68 km/hr，大部份鷹群(24.83 %)飛行速度集中在 20-30 km/hr(圖 3)，平均為 39.75 ± 21.59 km/hr (n=72)，而以山線(37.82 ± 18.35 km/hr, n=28)或平原線(38.75 ± 23.29 km/hr, n=37)遷徙的鷹群在飛行速度上並無顯著的差異(Mann-Whitney U, $p=0.948$)。

四、討論

(一)飛行路線

配合墾丁和七股兩處雷達資料我們已可大致掌握

(2005)以飛行速度研判其夜宿地應該在南邊 160 km 處的巴丹島。

本季灰面鷲鷹多數沿著中央山脈西緣北上，和李璟泓(2002)的看法一致，不過他的報告因為欠缺雲嘉

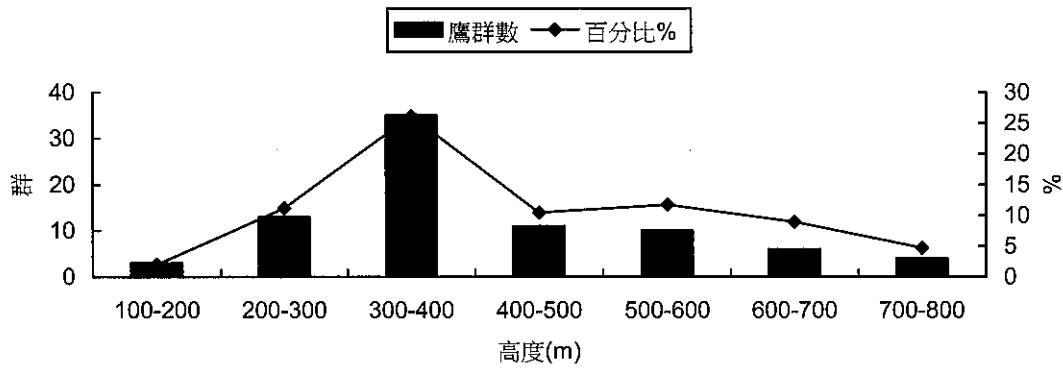


圖 2、灰面鷲鷹飛行高度之群數統計與其佔總回波值之百分比

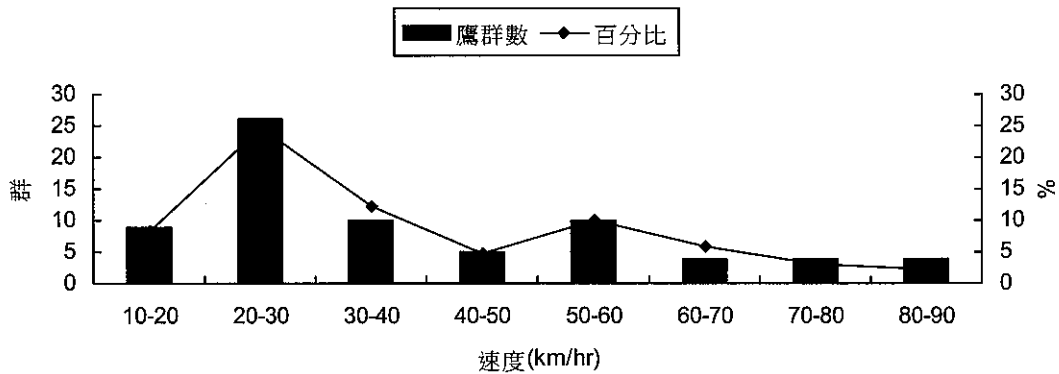


圖 3、灰面鷲鷹飛行速度之群數統計與其佔總回波值之百分比

2005年3月灰面鷲鷹經過恆春半島與過境台灣中南部的調查點，在路線的描繪上出現空白，巧的是因鷲鷹飛行高度關係在越靠近台南地區會進入雷達死角，不過並不影響雷達在雲嘉南部份地區的飛行路線之描繪。事實上，雷達就顯示，經過雲林地區的鷲鷹主要是來自南邊由鳳山水庫周邊地區過境的鷲鷹，行經此路線的鷲鷹主要來自春日鄉山區夜棲的鷲鷹，通常比較晚到的鷲鷹走中央山脈西緣，而春日鄉是鷲鷹由恆春半島北上的十字路口。鷲鷹在春日鄉分道飛行的現象則證實了李璟泓(2002)的推測，從衛星地圖上可見，春日鄉剛好為山區與平原的交接地帶，以春古路為界線，東側為中央山脈，西側則為平原，從恆春半島，而是直接由恆春外海一路飛來，王誠之和孫元勳

南地區的調查點，在路線的描繪上出現空白，巧的是因鷲鷹飛行高度關係在越靠近台南地區會進入雷達死角，不過並不影響雷達在雲嘉南部份地區的飛行路線之描繪。事實上，雷達就顯示，經過雲林地區的鷲鷹主要是來自南邊由鳳山水庫周邊地區過境的鷲鷹，行經此路線的鷲鷹主要來自春日鄉山區夜棲的鷲鷹，通常比較晚到的鷲鷹走中央山脈西緣，而春日鄉是鷲鷹由恆春半島北上的十字路口。鷲鷹在春日鄉分道飛行的現象則證實了李璟泓(2002)的推測，從衛星地圖上可見，春日鄉剛好為山區與平原的交接地帶，以春古路為界線，東側為中央山脈，西側則為平原，從恆春半島北上的鷲鷹在這裡可選擇東側一南北走向的山

線，或西側的平原線，因此鷹群多在此分道。至於 2005 年灰面鵟鷹的遷移路線是否具有代表性，有待後續研究。

(二)飛行高度

透過雷達的研究可以知道影響飛行高度的因素包括了地理位置、物種、地形、遷徙時段、氣候和飛行方式(振翅或滑翔)Kerlinger(1989)。從 2005 年春季七股雷達中發現，以山線遷徙的灰面鵟鷹群其飛行高度顯著的高於以平原線遷徙的鷹群，這可能是台灣四面環海且地形起伏大，由海陸和地形差異加熱引起的局部環流所造成，因內陸山區山谷風環流較旺盛(錢之駿，2003)，鷹群可利用局部環流盤旋至高處再以滑翔飛行(soaring flight)前進 Meyer et al.(2000)，因此當鷹群在盤旋時可較輕易的盤旋至 500 m 以上，亦或是鷹群原本的起鷹地點就在山區，造成以山線遷徙的鷹群其飛行高度顯著的高於以平原線遷徙的鷹群約 130 m。

(三)飛行速度

2005 年春季墾丁雷達所估算灰面鵟鷹在巴士海峽的飛行速度為 57.6 ± 14.4 km/hr ($n=221$)，王誠之、孫元勳(2005)，較同時間於七股雷達中鷹群的飛行速度顯著快約 17.85 km/hr。這可能是因海面上局部環流較為缺乏，錢之駿(2003)，鷹群多以振翅飛行(powered flight)，而不似在陸域上可利用局部環流或山谷風環流盤旋至高處再以滑翔飛行(soaring flight)前進 Kerlinger(1989)，Meyer et al.(2000)。在陸域的滑翔飛行是較不耗費體力但較花時間的飛行模式 Kerlinger(1989)，Meyer et al. (2000)，因此當鷹群在向上盤旋時，其被雷達觀測到的移動速度可能因此較慢，雖然其從高空向下俯衝時的移動速度也會比平常的飛行速度較快(可達 85.68 km/hr)，但整體而言，於陸域上的飛行時速可能因此比海面上的飛行時速慢。另外，風相(風向與風速)也是影響飛行速度的原因之一，2005 年灰面鵟鷹群在海上遷移時的風相多為順側風 3 級，王誠之、孫元勳(2005)，相對其在陸域遷移時，風向多為側風和逆風 1 級，可能因此也影響了其速度。

(四)鷹群數量探討

1.地面遺漏數量

在地面調查時，能見度是一個影響所紀錄到鷹群

數量的主要原因，其受當時氣候和調查員經驗而不同，根據八卦山和觀音山的兩位資深調查員認為其能見度應不超過 3、10 km (李璟泓、陳世中，私人通訊)，而在 2004 年 9 月 18 日同步在社頂和 5.2 km 外的聯勤鵝鑾鼻活動中心觀測赤腹鷹得到的資訊，其能見度約少於半徑 7 km(孫元勳，未發表資料)，灰面鵟鷹雖然體型較大，但長期在八卦山的調查員認為能見度不會超過此範圍。因此本研究中將能見度定為半徑 10 km，已屬低估地面可能遺漏的數量。研究發現，通過八卦山調查點半徑 10 km 內的鷹群回波量僅佔總量的三分之一，除了通過八卦山東西側鄉鎮的遺漏數量外，台灣海峽北返的鷹群也是造成遺漏的原因。其中以 3 月 22 日來看，八卦山和鳳山水庫二處之地面調查僅記錄到 85 隻，而七股雷達卻觀測到約 16,000 隻，因為當日春返的這些鷹群不論是經海線(約 2,100 隻)或山線(約 14,000 隻)北移都未進入地面二調查點的能見度，故可得知現有的地面觀測點並無法完全的掌握每年春返時灰面鵟鷹群的數量。

2.雷達遺漏數量

二地面調查點觀測到的鷹群過境數量(26,826 隻)並無法完全呈現於雷達回波圖上(僅約 74%)，可能原因為本研究只選擇雷達螢幕上移動目標長度長達 1 km 以上的鷹群，或依能量和時間消耗原理，推測鷹群於陸域飛行時多會找尋並利用熱氣流盤升到一定高度再滑翔前進以節省遷徙時所需耗費的體力 Meyer et al. (2000)，其飛行高度可能在短時間內變化很大，以致於高於或低於雷達仰角可掃描到的範圍，造成雷達無法完整的呈現地面觀測到的資料，因此灰面鵟鷹實際過境數量除雷達回波值外仍需加上雷達遺漏地面資料的 26%。

3.鷹群實際數量推估

假設 10 km 的能見度界定標準屬實的話，以八卦山地面記錄 21,081 隻扣除雷達沒有顯現的 5,481 隻後來推算，雷達所顯示的鷹群回波值約 47,045 隻的灰面鵟鷹，若加上雷達所沒有顯示的部份，得知實際的過境數量約為 52,526 隻。這意謂著前一年秋季墾丁觀測的數量起碼要在五萬隻附近，可是當年卻只觀測到 23,140 隻，王誠之、孫元勳(2004)。本研究推測，短少之因可能和他們用來觀測數量的回歸式的代表性不

足有關，王誠之、孫元勳(2004)；或者有一些經由台灣以外地區南遷的灰面鵟鷹在春季改經本島返回繁殖地，此有待後續探討。

五、參考文獻

王誠之、孫元勳，2004：九十三年度墾丁國家公園春季及秋季過境猛禽族群調查，內政部營建署墾丁國家公園管理處研究報告。72頁。

王誠之、孫元勳，2005：九十四年度墾丁國家公園春季及秋季過境猛禽族群調查，內政部營建署墾丁國家公園管理處研究報告。65頁。

李環泓，2002：灰面鵟鷹2002年八卦山春季北返遷徙報告，野鳥7：167-178。

陳世中，2004：2004年春季觀音山猛禽遷移調查，台灣猛禽研究3：17-24。

陳恩理，2003：台灣歷年來猛禽研究文獻整理，台灣猛禽研究1：15-28。

蔡乙榮，1996：墾丁地區遷移性猛禽族群調查資料研究，野鳥5：51-55。

蔡乙榮、唐洪軒、林瓊瑤，2003：墾丁地區秋季遷徙性猛禽過境族群與過境期調查研究（1990年-2002年），第三屆亞洲猛禽研討會論文。38頁。

錢之駿，2003：台灣東南部地區複雜地形局部環流的模擬研究，中央大學大氣物理研究所碩士論文。66頁

藍正裕，2003：氣象雷達在墾丁地區赤腹鷹過境行為研究之應用，屏東科技大學野生動物保育所碩士論文。79頁。

Buss, I. O., 1946: Bird detection by radar, *Auk* 63: 315-318.

Doviak, R. J., and D. S. Zrnic, 1993: Doppler radar and weather observations, Academic Press, California. 547pp.

Eastwood, E., 1967: Radar Ornithology, Methuen Press, London. 278pp.

Ferguson-Less, J., and D. A. Christie, 2001: Raptors of

the world, Christopher Helm Press, New York. 982pp.

Gauthreaux, S. A., Jr., 1970: Weather radar quantification of bird migration. *BioScience* 20: 17-20.

Gauthreaux, S. A., Jr., and C. G. Belser, 1998: Displays of bird movements on WSR-88D: patterns and quantification. *Weather and Forecasting* 13: 453-464.

Gauthreaux, S. A., Jr., D. S. Mizrahi, and C. G. Belser, 1998: Bird migration and bias of WSR-88D wind estimates. *Weather and Forecasting* 13: 465-481.

Kerlinger, P., 1989: Flight Strategies of Migrating, The University of Chicago Press, Chicago. 179pp.

Larkin, R., 1984: The potential of the next radar system for warning of bird hazards, Proc. wildlife hazards to aircraft conference and workshop. Charleston, SC, FAA, 369-379.

McClure, H. E., 1974: Migration and survival of the birds of Asia. U.S. Army Medical component, South East Asia Treaty Organization Medical Project, Bangkok, Thailand.

Meyer, S. K., B. Spaar, and B. Bruderer, 2000: To cross the sea or to follow the coast? Flight directions and behavior of migrating raptors approaching the Mediterranean Sea in autumn, *Behavior* 137: 379-399.