

颱風對森林生態系的影響：福山啟示錄

◎國立臺灣師範大學生命科學系·林登秋 (tengchiulin@gmail.com)

颱風的熱點—臺灣，熱點中的熱點—福山森林生態系

熱帶氣旋在不同地區有不同名稱，在臺灣所在的西北太平洋地區被稱為颱風。颱風是臺灣最常見的天然擾動，自中央氣象局有氣象記錄以來，每年平均約有3~6個颱風侵襲臺灣。若以颱風中心距離福山最遠時不超過100 km作為判斷颱風是否影響福山森林生態系的標準，則在1954至2000年，每年平均有1.6個颱風影響到福山森林生態系。然而許多颱風雖未從福山附近通過也會帶來大量降雨，因此若考慮降雨的影響，那麼每年影響福山的颱風數量會比這個數字更高。

福山森林生態系驚人的穩定性

國人對颱風驚人的破壞力並不陌生，因為每當颱風過境，新聞中總是不斷出現樹倒、橋斷、公路坍塌、洪水肆虐甚至引發土石流災情的報導。但即便像莫拉克如此威力強大的颱風為南臺灣帶來近3,000 mm的降雨量，也僅在局部地區造成土石流災情，比起因莫拉克颱風而受創的土地，有更大面積的山林能年復一年的在颱風侵襲下屹立。究竟臺灣的山林是如何能在颱風的侵襲下屹立呢？由林業試驗所前所長金恆鏞博士與東華大學環境學院夏禹九院長帶領的一群生態學者，自1992年起在福山從事長期的森林生態系研究，累積多年的研究結果，讓我們對於福山森林生態系適應颱風的機制有相當完整的了解。

最是風雨故人來

1994年六個颱風侵襲臺灣，當年由金恆鏞博士領軍在福山森林生態系投入長期生態研究，王立志教授，致力於溪流水的研究，夏禹九教授著手於氣象水文研究(圖1)，筆者則從事酸雨對森林影響的研究。由於王立志教授對暴雨期間營養鹽輸出進行深入探討，而颱風降雨是暴雨之最，因此每當有颱風警報發佈，福山植物園關閉，遊客止步，我們卻反向操作，打包上山取樣，一共去了三次。到了第三次還真依稀聽到福山對我們說「最是風雨故人來」。當我們在取樣時目睹樹葉不停掉落地面，那個氣勢絕非落櫻繽紛足以形容，反倒像大地施展了吸星大法，讓樹葉毫無招架的能力。做為一個研究生態的人，腦中浮現的是「喔喔！葉子是植物行光合作用的工廠，是生態系生產力的來源，工廠大規模倒閉，生產力必然受到重創」。未來生態系要進



圖1 颱風期間，夏禹九教授帶領研究人員到福山，對颱風的水文化學進行取樣(林登秋 攝)

一步發展之前必定要先從颱風的傷害中回復，再想想颱風幾乎每年或每隔一年就會來，森林顯然會不停地在受創和回復間擺盪。因此如果想要對福山森林生態系有充分的了解，就不能不深入了解颱風在其中扮演的角色。

全球熱帶氣旋對生態系影響的研究現況—偏差的取樣

雖然臺灣所在的西北太平洋地區是全球熱帶氣旋發生最頻繁的區域，全球有關熱帶氣旋對生態系影響的研究最多的，卻是來自熱帶氣旋頻率相對較少的北美洲和中美洲，在此熱帶氣旋被稱為「颶風」。此外最近澳洲也有為數可觀的成果發表，日本則有零星的發表。綜觀全球，有關熱帶氣旋的生態研究，最多來自美國東北部的哈佛森林(Harvard Forest)及中美洲波多黎各的Luquillo實驗林。然這兩地發生颶風的頻率遠不及臺灣，以波多黎各為例，相當於強烈颱風等級的颶風發生頻率約每10年1個，而美國東北部一帶三級以上的颶風發生頻率約每50年1~2個。

筆著以「颶風和森林」及「颱風和森林」為關鍵字利用網路工具google scholar進行搜尋，前者文章的數量為後者的三倍。亦即目前我們所了解的熱帶氣旋對森林的影響，主要是來自熱帶氣旋發生頻率較低的地區，就了解全球熱帶氣旋對生態系的影響而言，這顯然是一個偏差的取樣，因為這並未考量到因地而異的熱帶氣旋對生態系的影響。而根據福山森林生態系的長期研究，我們有足夠的資料說明，熱帶氣旋對福山森林生態系的影響迥異於其它地區，不能用其它地方的研究成果來推論颱風對此地生態系的影響。

擾動最頻繁之處有著最具抵抗力的生態系—福山森林生態系

在美國東北部的哈佛森林和中美洲波多黎各的Luquillo實驗林研究顯示，三級以上的颶風(相當於強烈颱風等級)，常造成大規模的林木被連根拔起，或者主幹被折斷而死亡。林木的死亡率通常在20%以上，部分地區更可達到90%。反觀臺灣，即使在1994年受到六個颶風侵襲，福山森林生態系卻僅約4.5%的樹木被連根拔起或折斷，1996年賀伯強烈颶風中心幾乎直接穿越福山，而颶風過後的調查顯示，樹木死亡率低於2%。

根據《熱帶氣旋百科全書》(Encyclopedia of Hurricanes, Typhoons, and Cyclones)記載賀伯颶風是30年來侵臺強度最大的颶風，但即使在如此強烈颶風的侵襲下，福山森林生態系仍能屹立不搖。不禁令人好奇，福山森林生態究竟具備何種特性足以對強烈颶風的侵襲產生極高的抵抗力？其實除了極高的抵抗力之外，此一生態系在颶風侵襲後還有極高的回復力。由福山森林生態系的樹冠「葉面積指數」(可視為葉子數量的指標)的長期監測發現，除1994年六個颶風侵襲之外(圖2)，福山森林生態系即便遭遇賀伯颶風造成的大量落葉，也能在一年後回復到颶風前的水準，而其它地方研究指出：遭受強烈颶風侵襲的森林需要多年時間才能回復。相較之下，福山森林生態系的「回復力」和「抵抗力」一樣十分令人驚嘆！



圖2 1994年六個颱風侵襲後造成福山森林生態系枝葉大量掉落，圖中為林則桐先生在林下測量「葉面積指數」(林登秋 攝)

穩定生態系的兩個特性：「抵抗力」與「回復力」

生態學家在討論一個生態系的穩定性時，常採用二個指標進行判斷，即「抵抗力」與「回復力」。一個生態系遭逢擾動時，若具備很強的抵抗力，則能維持其結構與功能不受擾動的破壞，這就是一個穩定的生態系；而一個缺乏高抵抗力的生態系，若能在擾動之後快速回復到擾動前的結構功能，具備此一回復力者也可說是一個穩定的生態系。雖然並沒有報告指出這兩個特質不

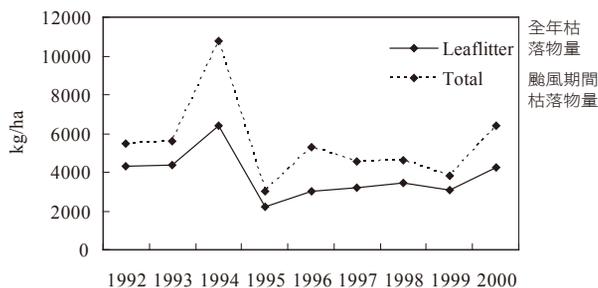


圖3. 自1992年至2000年福山全年枯落物量與颱風期間枯落物量之比較(颱風期間枯落物量占全年枯落物之83%)(林登秋 製)

能並存在一個生態系，但多數的研究在報導一個穩定的生態系時，幾乎都聚焦二者之一。亦即多數研究暗示，「抵抗力」和「回復力」是生態系二擇一的能力。然而從福山森林生態系的研究發現，這二種能力不但同時存在，而且二者之間形成正向的關係。

颱風挾帶巨大能量所造成的影響最明顯的便是大量的落葉(圖3)，1994年六個颱風造成福山稜線附近約2/3的葉子掉落，對森林生態系的生產力而言，實在是難以承受的損失。森林要維持原有的結構與功能，必需能在短時間內將損失的葉補長回來。由於這些樹木只是枝葉掉落(圖4)，而臺灣位處亞熱帶溫暖多雨，因此在颱風過後林木能快速把葉

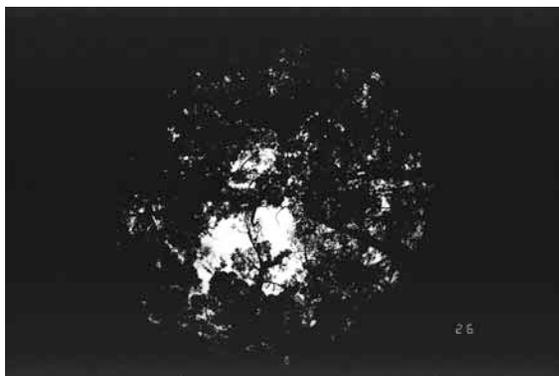


圖4 賀伯颱風造訪前(左)與後(右)在同一地點所拍攝之半球影像，可看出枝葉掉落，但樹木並未傾倒，因此森林在颱風過後可很快回復(江智民 攝)

子長回來而呈現高回復力。反觀北美洲及中美洲，由於樹木的大量死亡，若要回復到颶風擾動前的水準，必需等待小苗長成大樹，生產力才能完全回復，因此就需經歷小規模的次級演替，以致所需的復原時間遠長於福山森林生態系。換言之，福山森林生態系之所以有高回復力是拜高抵抗力之賜。

生存之道：團結力量大、以小事大、棄車保帥

颱風具有把樹木連根拔起的強大威力，颱風期間常看到都市地區的行道樹被強風連根拔起，有時甚至是一整排的行道樹受災。而在臺灣的森林鮮少看到這種現象，如果在森林裡出現一小片樹木傾倒，最主要的原因通常不是被風吹倒而是遭豪雨引發的土石流所推倒。或因一棵大樹被吹倒時，波及臨近的樹木。究竟為什麼森林裡不易像行道樹一樣出現大規模的風倒木呢？此乃因行道樹多為單排種植，少數為雙排，幾乎沒有三排以上的種植，於是每一棵樹面對強風時，幾乎

都是獨立抗戰。反觀森林中千百棵樹木相互支持，團結力量大，因此不易形成風倒木。

若與美國東北部樹林相比，又是什麼原因使得福山森林生態系的樹木不易因風而倒呢？走趨福山森林，可以發現這片天然林裡少有大樹，且樹木的冠層平均高度僅約11 m(圖5)，不但遠低於美國東北部和波多黎各超過20 m的森林，與臺灣中部的蓮華池森林生態系平均高度相較，後者遭逢颱風頻率約為福山的一半，森林冠層的高度約13 m(圖6)。人在強風吹襲時蹲下來和站著就可以明顯感受到所受風力的差異，可謂「樹大招風」，而福山森林生態系低矮的樹冠讓林木更能在颱風侵襲時屹立不搖。調查發現：被颱風吹倒的樹，其平均高度較颱風前對樹木所測的平均高度高。這可說明「以小樹事大風」是福山森林生態系對颱風的侵襲極具高抵抗力的重要原因。可以想像少數強出頭而高人一等的樹，高出一般樹冠的部分因為少了鄰木的相互支持，颱風期間必需獨立承受強風的侵襲，因此容易被吹倒。久而久之，塑造了福山森林生態系林冠低矮的特性。換言之，成群低矮的樹木是颱風雕塑的結果，而這



圖5 福山森林生態系的林木比一般低矮，平均樹冠高度低於11 m(蕭泓混 攝)

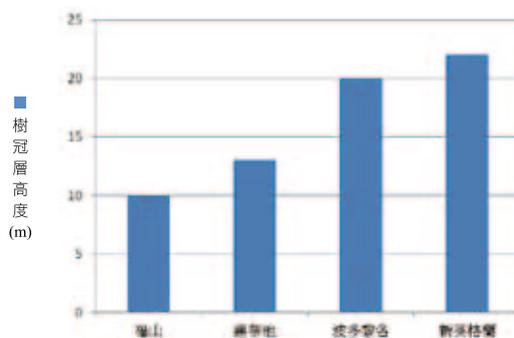


圖6 福山、蓮華池、波多黎各、新英格蘭四個地區樹冠高比較(林登秋 製)

樣的結構也讓福山的林木不易被強風吹倒。

颱風挾帶巨大的能量通過福山，卻僅有少數的林木傾倒，難道如此巨大的能量進出，對福山森林生態系不會造成傷害嗎？答案是否定的，這些能量造成了前面所講的大量落葉，而落葉很可能也是林木得以在強風中屹立的重要機制。設想一個人在颱風期間站在馬路中央，如果手上拿了二把傘而且都撐開，那麼這個人很有可能被風吹倒，如果他一感受到強風吹襲，就立刻收傘，就會大大減少受風的面積，被吹倒或吹跑的機率就大幅減少。但別忘了，葉是光合作用的工廠，所以落葉並非小事，反而是對生產力構成重大的影響，然而與被風吹倒相比，落葉可能是一個不得不的好方法，或許可以用「棄車保帥」來形容。葉掉了容易再長回來，但樹死了，就得從種子或小苗開始歷經漫長的過程，然而在福山這個颱風幾乎年年拜訪的森林，這一條漫漫長路顯然不是一個好的選擇，而這一點可以從下雨公認的溪流水化學變化看得更清楚。

颱風不只是風

國際上有關熱帶氣旋對生態系影響的研究，在2005年卡翠納颶風之前，大多著重於強風造成的傷害之後的回復，然而身處臺灣體會到的是，颱風挾帶的超大豪雨往往才是造成重大災情的元凶。1989年波多黎各的Luquillo實驗林遭逢三級颶風Hugo侵襲，造成約20%的林木死亡。根據溪流水質監測資料顯示，Hugo侵襲後溪流水中的許多營養鹽，如硝酸根濃度(【NO₃】)大幅上升，大約500天後回復到颶風前的水平，當地研究者以回復快速(rapid recovery)來形容這個過程。然



圖7 颱風期間溪流水水位大幅上升，伴隨大量營養鹽流失，但在幾天內就回復到颱風前的水平(林登秋 攝)

依王立志教授在福山森林生態系對溪流水進行長期監測，結果發現在1996年賀伯颶風侵襲時(圖7)，溪流水中的多種營養鹽濃度也大幅上升，但5天後就回復到颱風前的水平，如果500天可以稱為快速，那麼5天可能要用超快速來形容。為什麼會有這麼大的差異呢？溪流水營養鹽濃度大幅上升，表示有大量的營養被帶離生態系，姑且不論是什麼機制讓福山森林生態系的溪流水有這麼快的回復能力，如果福山森林生態系的回復速度和Luquillo實驗林一樣快，需要500天，而福山平均每年有1.4個颶風侵襲，那麼營養隨溪流大量流失，在尚未回復之前可能又將面臨一個以上的颶風，根本來不及回復而會一直處於大量流失的狀態。如此一來，可能在數年到數十年之間森林的營養就被淋浴殆盡，而生態系的結構與功能勢必因營養的耗竭而發生改變。因為Luquillo實驗林約10年(3,650天)才有一個颶風侵襲，因此500天回復之後尚有很長的一段時間才會遭遇另一個颶風的侵襲，這樣的回復速度就夠快速了，而在颱風擾動更頻繁的福山森林生態系則非得有更快的回復速度，否則不足以維持森林的結構與功能。

福山森林生態系為何能這麼快速地回復呢？答案可能還是在他的高抵抗力，在Luquillo實驗林和美國東北部的森林，由於颶

風造成大量樹木傾倒死亡，因此根部就失去了吸收營養鹽的能力。所以營養鹽在缺乏樹根吸收的情況下大量流失，一直要到林下植物在颶風過後因林冠被破壞，光線大量進入林下而加速生長之後，才能有效把營養鹽留置在生態系中，因此需要500天才能使溪流水中的營養鹽濃度回復到颶風前的水準。而在福山因為林木死亡率很低，大部分的樹木在颶風侵襲期間和來襲之後，都能有效的吸收營養元。所以在福山森林生態系，颶風造成枝葉掉落，豪雨將大量營養鹽從枝葉和土壤中淋溶出來而進入溪流水中，造成溪流水中的營養鹽濃度大幅上升，然而一旦風靜雨停，缺少豪雨的淋溶樹木又能有效吸收，溪流水中的營養很快就回復到颶風之前的水準。

豪雨不是好雨！？

無論是2009年的莫拉克颶風、2005美國的卡翠娜颶風或者1996年的賀伯颶風，最大的災難都是豪雨所引發的。颶風帶來的豪雨幾乎成了臺灣人對颶風恐懼的來源。據林俊全博士在福山的研究指出，颶風引來的豪雨在短短幾天所造成的泥沙輸出量是全年非颶風期間的數百倍，豪雨驚人的力量可見一般。平常降雨時就有泥沙會被沖刷，但因沖刷力不足，所以泥沙會堆積在河道中，等到像颶風期間所發生的豪雨出現時，才有能量造成更大的沖刷，並把原本在河道中的泥沙一起沖到下游。所以常常在颶風暴雨發生後出現滾滾濁流，有時甚至因此而造成自來水的原水過度混濁，而有下大雨卻停水的怪異現象。

然而，豪雨果真一無是處嗎？根據福山長期的降雨資料，福山地區的平均年降雨

量約為4,240 mm，其中約有25%來自颶風降雨(圖8)。1993年並未有颶風造訪，年降雨量僅有2,900 mm，而在颶風侵襲的年份則可超過6,000 mm。福山位在臺灣東北部，即便沒有颶風的降雨，年降雨量仍可高達近3,000 mm。反觀臺灣中南部，冬季有較長的乾季，而夏季若無颶風雨，隔年春雨來之前可能面臨嚴重的乾旱限水問題。因此颶風的豪雨可能帶來災情，但少了這些雨，臺灣的水資源將面臨更嚴苛的挑戰。只是豪雨災情的印象太深，容易讓人忽略了颶風雨解渴的功能。

颶風對福山森林生態系的結構沒有影響？

許多有關颶風對森林生態系的研究，說明不同的樹種有不同的抗風能力，因此颶風過後不耐風的樹種族群數量會下降，而森林的結構也會因此而發生改變。1996年一位當時在Iowa State University攻讀博士的女學生，到福山調查颶風倒木，結果發現颶風並沒有選擇性的吹倒某些樹種，因此颶風前後森林樹種的組成並沒有發生變化。那麼是否可以說颶風對福山森林生態系的結構沒有影響呢？答案是否定的！但是在我們解釋這一點之前，先來討

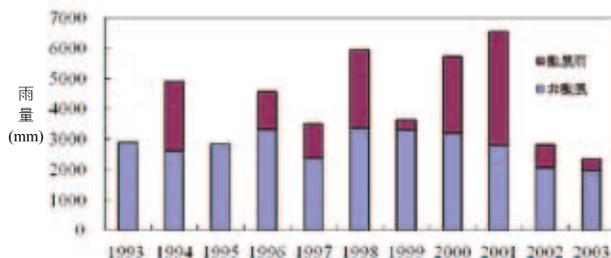


圖8 1993~2003年間的年降雨與颶風所帶來的降雨，颶風期間的降雨可以占年降雨量的一半以上(林登秋 製)

論為何在福山和其它地方會有不同的結果呢？原因應該還是和福山颱風擾動的頻率高有關。

美國東北部遭逢強烈颱風等級的颶風機會約每百年1~2個，如果樹木在颶風期間被吹倒，仍然有機會在下一次颶風來襲之前由小苗再長成大樹。即便是波多黎各，約每10年遇上一次颶風，易被風吹倒的樹種也有可能在下一次颶風來襲前由小樹長成大樹。反之，容易被颶風吹倒的樹種，在颶風幾乎年年造訪的福山森林生態系，根本沒有立足的機會。換言之，能在福山建立穩定族群的樹種都是能適應頻繁颶風侵襲的樹種，也就是說目前分布在福山的原生樹種都是歷經颶風千百年來，千錘百鍊考驗篩選留存下來的。再換個角度說，颶風對福山森林生態系的結構是有深遠的影響，因為目前福山森林生態系的組成是經過颶風長期汰選的結果，是颶風型塑出今日福山森林生態系的面貌。沒有颶風的侵襲，福山的容顏必然會迥然不同。

颶風會增加或減少生物多樣性？

中美洲、北美洲和澳洲的研究都指出，由於熱帶氣旋會造成大量樹倒，許多原本不易在陰暗林下生長的植物，在擾動之後才有機會出現，因此熱帶氣旋的擾動對生物多樣性有所貢獻。不僅如此，在這些倒樹形成孔隙中，會發生小規模的次級演替，進行森林的天然更新。那麼在沒有大孔隙的福山森林生態系，颶風對生物多樣性是否就沒有貢獻呢？或者颶風會不會反而造成生物多樣性下降呢？根據在福山森林生態系長期的研究，由於頻繁的颶風擾動，因此林下平均光照相當高，經常維持在森林沒有遮蔽處的20%以

上。但是當颶風侵襲森林時對林冠的影響並不是均勻的，有些地方受擾動程度大則落葉嚴重，因此即使沒有大的孔隙，林下光照也相當高，在賀伯颶風過後有些林下的光照量甚至可以達到林外的30%，和其它受熱帶氣旋所形成的大孔隙相去不遠。另外有一些地方的林冠受颶風破壞小，林下光照量只有林外的3%。因此雖然沒有許多大孔隙，林下卻有光暗不同的微棲地，讓耐陰及不耐陰樹種均能在森林生長，維持了植物多樣性。

福山的現在是別人的未來，那福山的未來呢？

許多全球氣候變遷的研究指出，未來全球發生強烈熱帶氣旋的機會可能增加，目前北美和中美洲地區發生颶風的頻率比福山低很多，若遇更頻繁的強烈颶風時，對當地的森林生態系會有什麼影響呢？福山的研究顯示，這些地方的森林是否能適應更頻繁的強烈颶風的擾動，端看這些森林生態系能否及時發展出和福山一樣的適應機制，如低矮的樹冠、容易被強風吹落的葉子，有如「棄車保帥」等。也就是他們若要知道他們森林的未來，應該好好學習臺灣的森林是如何面對頻繁的颶風擾動。

那福山呢？如果強烈颶風變得更強，那麼適應現有颶風頻率與強度的福山森林生態系是否仍能適應呢？會不會變得更低矮呢？擾動後回復還能更快嗎？因為福山位在颶風熱點中的熱點，我們又沒有其他強烈颶風頻率更高的地方可以借鏡，要了解颶風對福山、對臺灣生態系的影響，我們需要在地長期的研究才能洞燭先機，預做判斷並及早因應。⊗