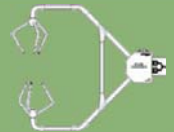


臺灣大學實驗林碳通量觀測研究

賴彥任¹ 余瑞珠¹ 蔡明哲² 王亞男²

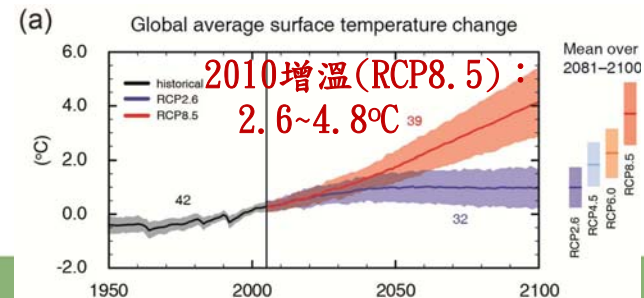
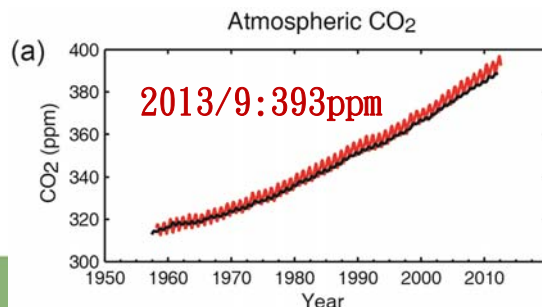
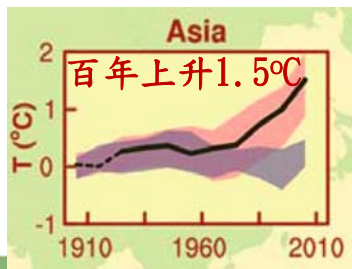
1. 臺灣大學實驗林管理處
2. 臺灣大學森林環境暨資源學系



前言



- 工業革命改變了人類的生活模式。石化燃料的使用、森林大面積被砍伐及開墾等，人類的溫室氣體排放，導致全球氣候變遷。
- 1988年「聯合國環境規劃署（UNEP）」與「世界氣象組織（WMO）」共同成立「政府間氣候變遷專家委員會（IPCC）」
 - 1990: First assessment report (FAR)
 - 1995: Second assessment report (SAR)
 - 2001: Third assessment report (TAR)，暖化證據已相當明顯，但氣候可能產生何種結果目前難以論斷。(likely; >66%可能性)
 - 2007: Fourth assessment report (AR4)，確認人類活動與全球暖化之間的因果關係。(very likely ; > 90%可能性)
 - **2013: Fifth assessment report (AR5)**，人為影響對於1951-2010年間全球地表平均溫度的升高是極為可能的。(>95%，extremely likely)



臺灣高山長期月均溫變化趨勢

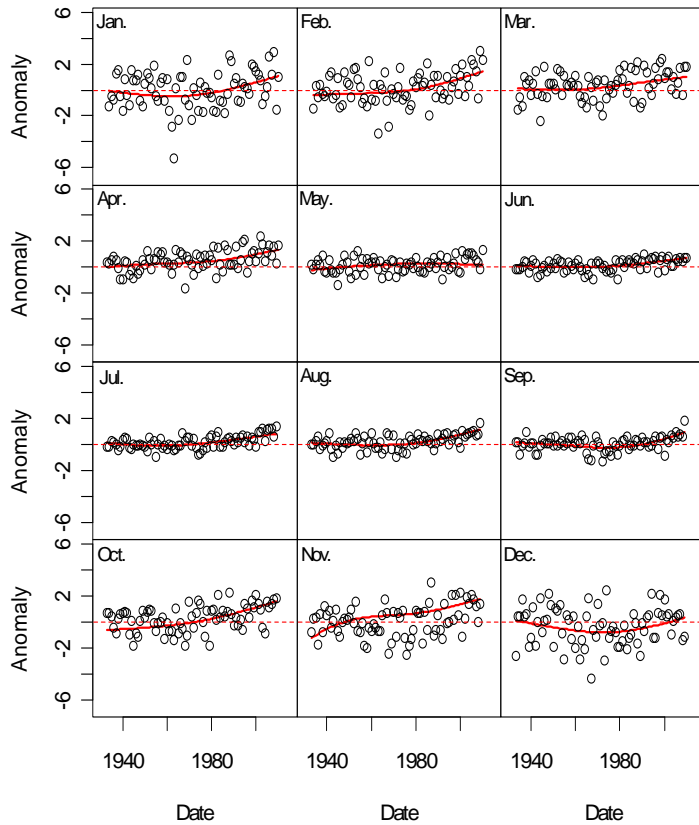


兩地的冬季升溫情形較夏季顯著, 冬季上升 $1.5-2.0^{\circ}\text{C}$

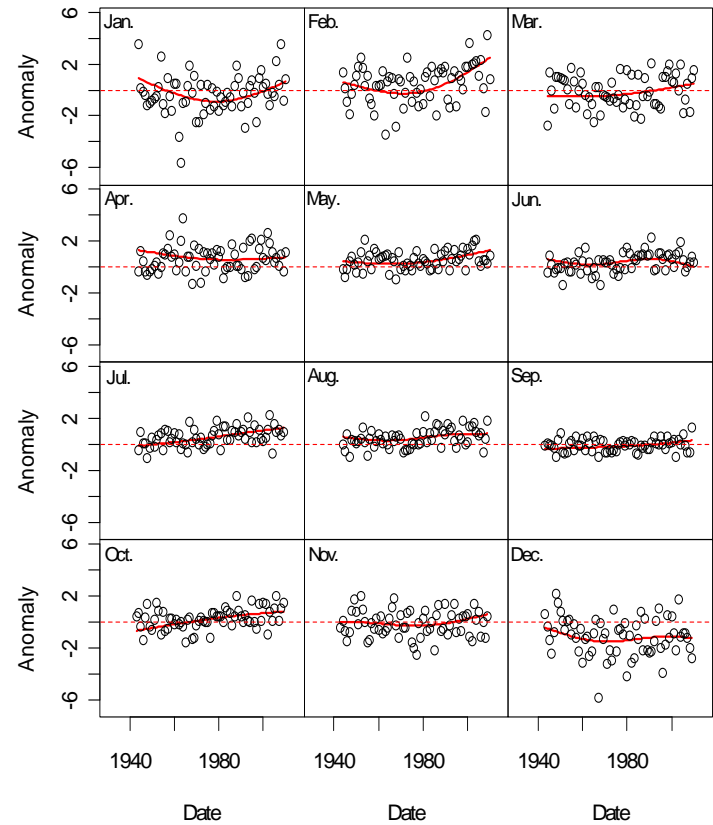
阿里山

玉山

Alishan_1_平均氣溫Nstd=0.1_Trend7_natural.csv



Jade_1_平均氣溫Nstd=0.1_Trend7_natural.csv

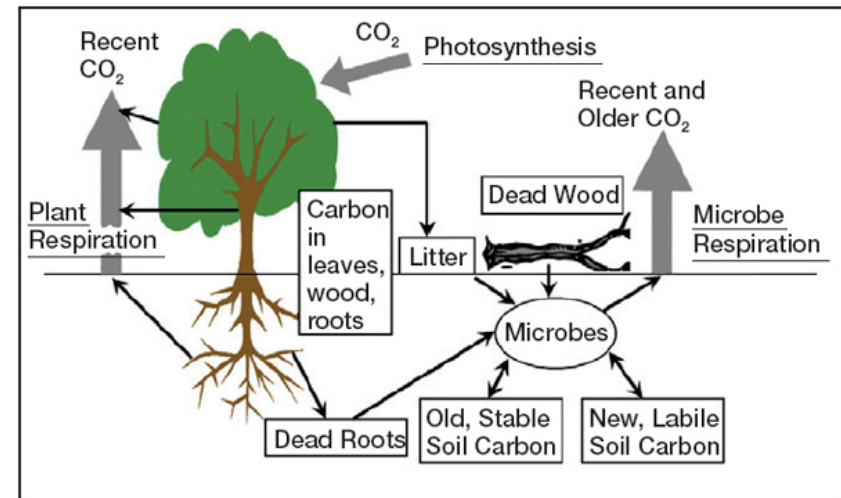


IPCC 國家溫室氣體盤查指南



- 藉由森林固定主要溫室氣體(CO₂)以減緩全球暖化現象，在氣候變化綱要公約與京都議定書中皆受肯定。甚至明文規定**森林碳吸存** (carbon sequestration) 的定義及量化方式，並提出具體的二氧化碳減量機制。藉由**森林行光合作用固定二氧化碳來減緩溫室效應**將是全球一項趨勢。
- IPCC 國家溫室氣體盤查指南(2006 IPCC Guideline for National Greenhouse Gas Inventory)指出的盤查部門第3項，農業、森林和其他土地利用 (Agriculture, Forestry and Other Land Use, AFOLU)，規範森林碳庫的調查項目包含：

- 地上部生物量 (Aboveground biomass)
- 地下部生物量 (Belowground biomass)
- 枯死木 (Dead wood)
- 枯枝落葉 (Litter)
- 土壤有機質 (Soil organic matter)

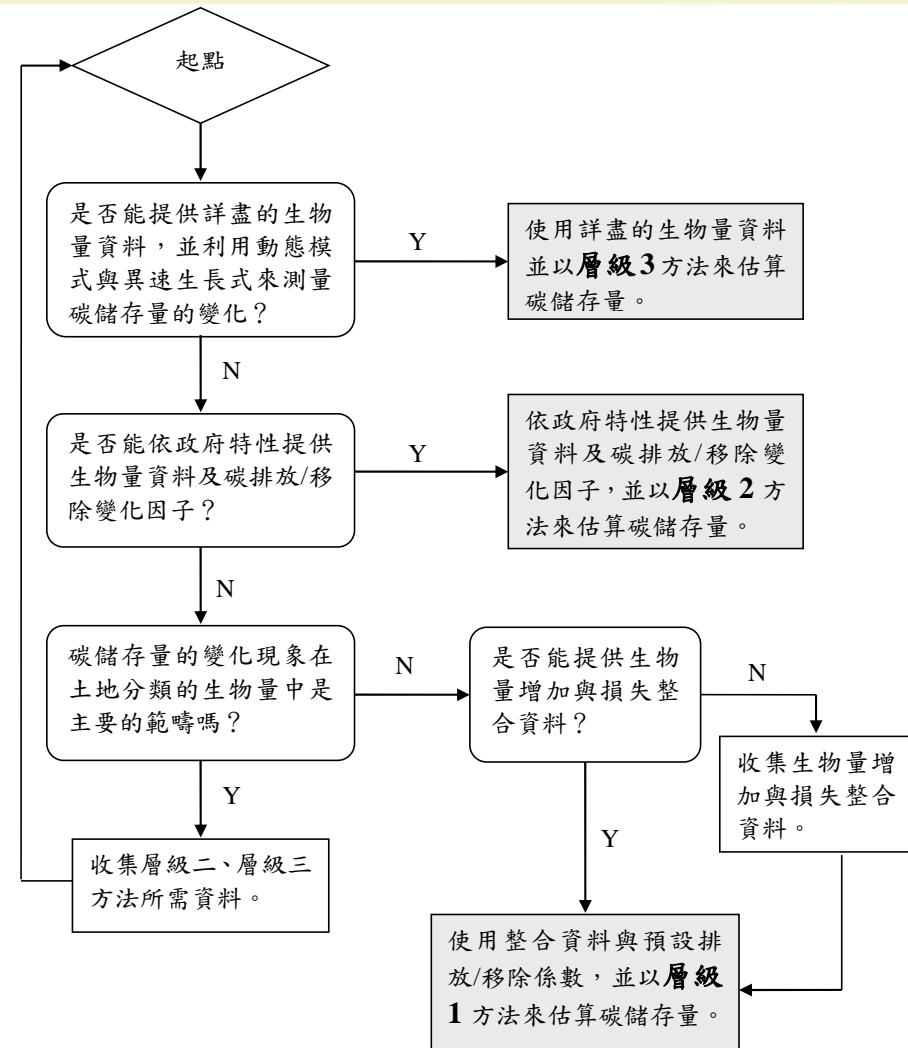


(邱祈榮, 2009; Ryan et al., 2010)

碳量估算層級方法決策樹



- 層級1(Tier 1):使用IPCC指南所提供的估算方法、函數及係數預設值 (default parameter values)。
- 層級2(Tier 2):使用與層級一相同的估算方法，但所採用的相關係數則為本國或特定地區調查的數據。
- 層級3(Tier 3):以GIS為基礎，結合林齡、林地分類以及生長調查和土壤調查，整合多種適合的模式、調查系統與監測系統，以分析不同時間的土地利用與碳量變化。層級三所需的品質管控、檢核及驗證更加嚴格。

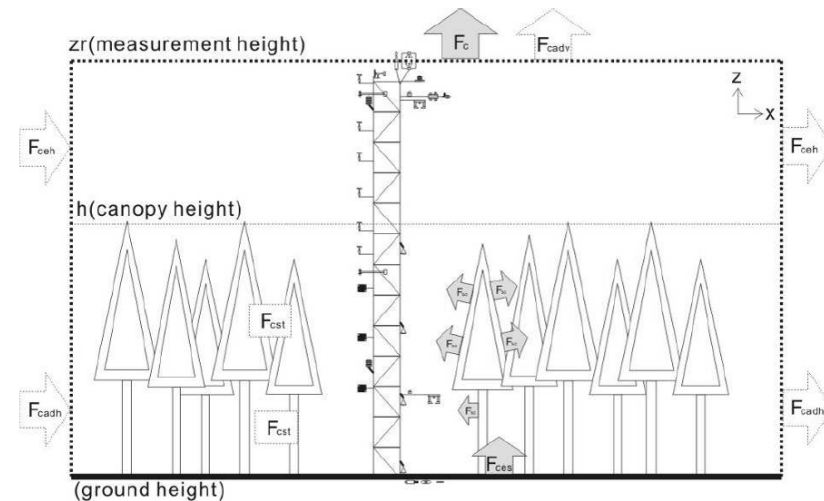
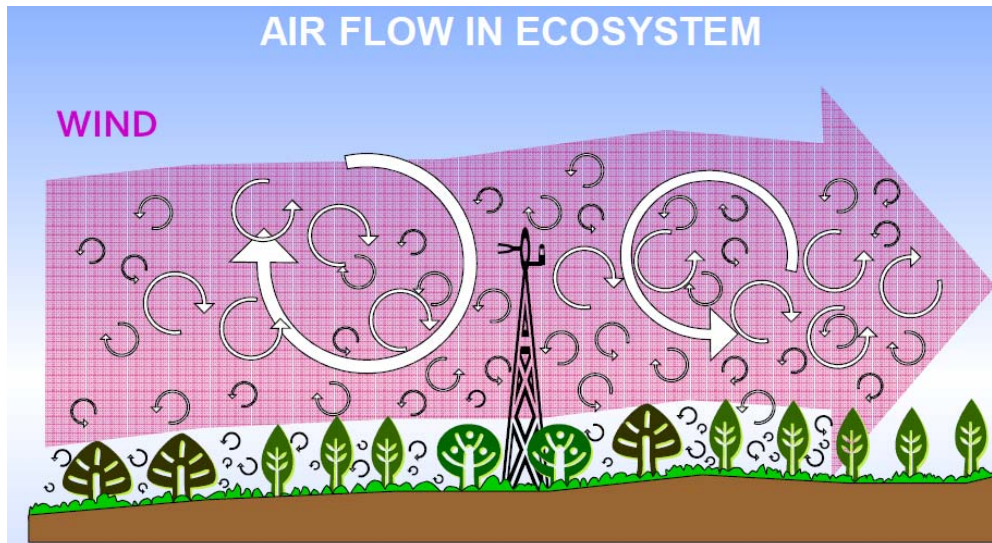


(邱祈榮, 2009)

通量觀測

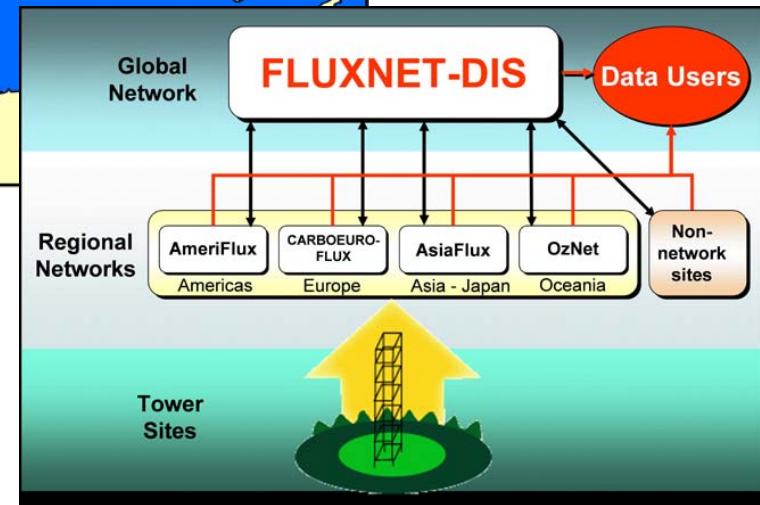
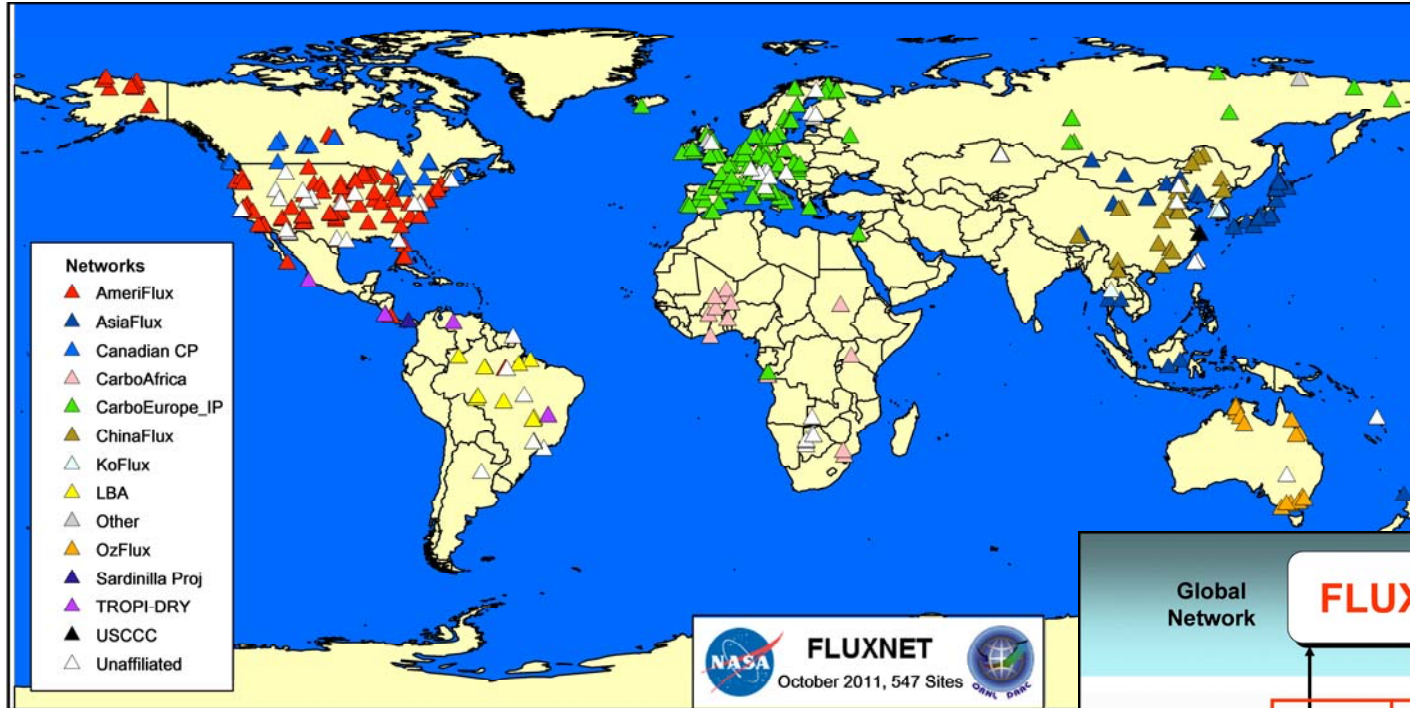


以渦流相關法(Eddy covariance)為基礎的通量觀測站，設置目的為探討森林在對碳吸存貢獻量、水土、大氣、動植物等長期生態監測相關研究，以瞭解森林生態系與環境變遷間之互動關係。可提供各項估算層級之參數與驗證數據。



(Burba and Anderson, 2010)

全球通量觀測網



(Fluxnet website, 2013)

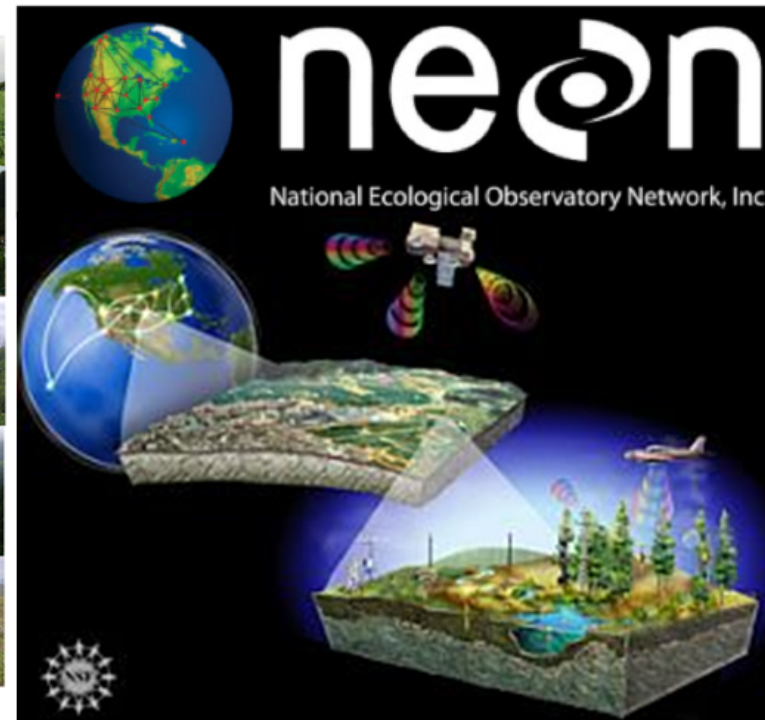
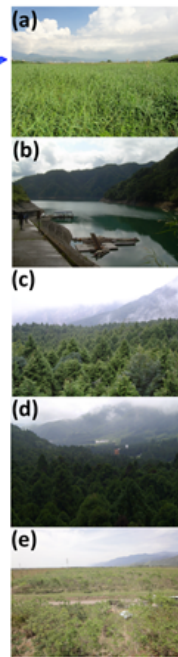
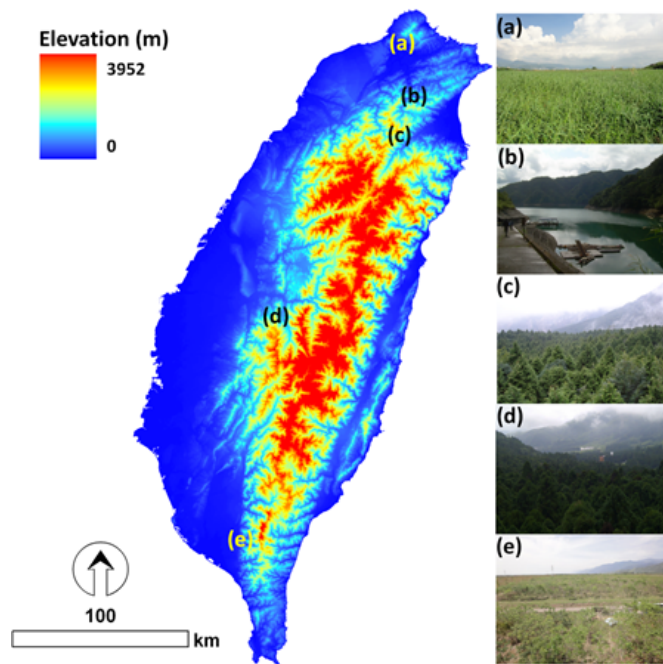
Integrated Research Project: EcoNTU



EcoNTU

Ecosystem observatories for a Network of Terrestrial Units

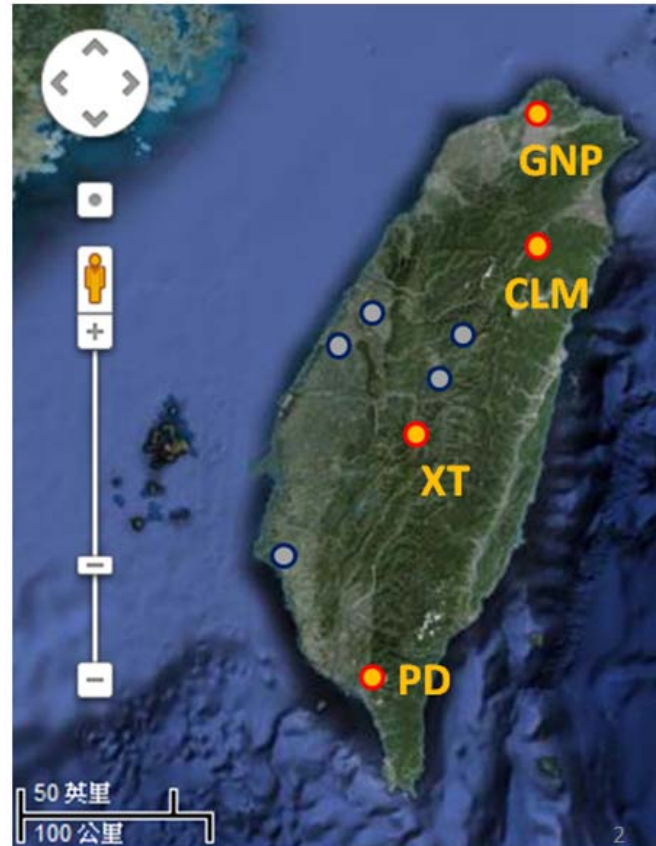
A synoptic sensing system to monitor Taiwan's terrestrial environment



Flux Tower @ National Taiwan University (NTU)



1. Chi-Lan Mountain (CLM)
1600 m a.s.l.
Evergreen needle leaf forest
 2. Guandu Natural Park (GNP)
4m a.s.l
Grass marsh ecosystem
 3. Xitou NTU Exp. Forest (XT)
1150m a.s.l
Evergreen needle leaf forest
 4. Pingdong Planted forest (PD)
70m a.s.l
Newly planted broad leaf forest
- NTU flux towers
 - Other flux towers

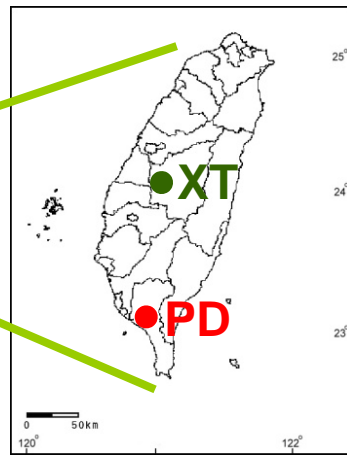


CLM is operated by Dept. of Geography NTU and National Dong-Hwa Univ.
GNP is operated by Dept. of Geography NTU.
XT and PD are operated by NTU Exp. Forest and Dept. of Forestry, NTU

臺灣大學實驗林通量觀測站



- 屏東測站建置於2008年年初(PD, 22°31'N, 120°36'E, 60m a.s.l.)
- 溪頭測站建置於2008年年末(XT, 23°40'N, 120°48'E, 1250m a.s.l.)





屏東通量站



臺灣的平地景觀造林



- 臺灣的平地景觀造林政策是配合京都議定書而施行。
- 平地造林除了有國土保安、資源保育、景觀維護、維護生物多樣性之存續效應外，**造林木從空氣中吸收二氧化碳、改善大氣組成，以減緩溫室效應**為另一主要目的。
- 平地造林主要適用範圍：**平原邊際**、復耕性低農地、嚴重地層下陷地區及改善完成之重金屬污染農地。
- 自 2002 年 1 月 1 日開始執行，至 2005 年底止，平地造林面積為 **8,010 公頃**。



屏東測站



- ❧ 試驗區於2002年以前，原為台灣糖業股份有限公司之甘蔗田，由於臺灣製糖成本提高，不敷成本，配合政策下，進行造林。
- ❧ 2002-2003年之間，試驗地以**14種落葉性闊葉樹種**進行造林作業(Afforestation)。
- ❧ 長期監測瞭解**亞熱帶造林地**的碳、水、能量通量變化及政策施行成效。



Photo date: 2011/11/29



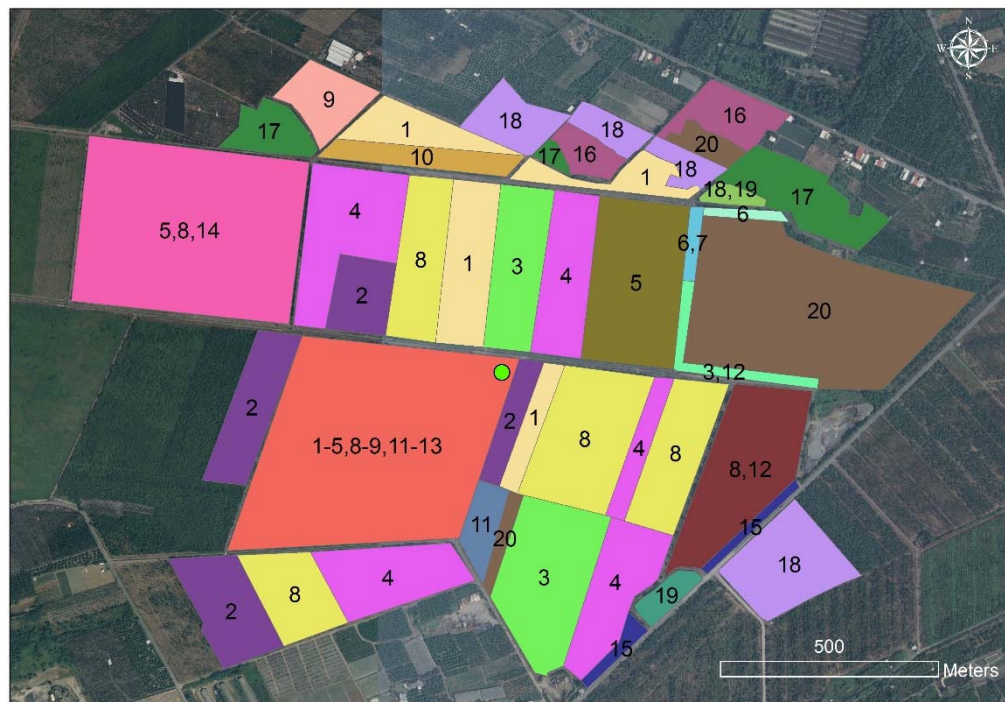
Photo from :<http://tw.myblog.yahoo.com/dobby-alicia>



植林樹種及土地利用型



No.	Chinese Name	English Name	Latin Name
1	桃花心木	Honduras Mahogany	<i>Swietenia macrophylla</i> King
2	苦楝	Chinaberry	<i>Melia azedarach</i> L.
3	印度紫檀	Rose Wood	<i>Pterocarpus indicus</i> Willd
4	欖仁	Indian almond	<i>Terminalia catappa</i>
5	光臘樹	Formosan Ash	<i>Fraxinus griffithii</i> C. B. Clarke
6	樟樹	Comphor	<i>Cinnamomum camphora</i> (L.) Presl.
7	土肉桂	Cinnamon	<i>Cinnamomum osmophloeum</i> Kanehira
8	臺灣欖	Taiwan Zelkova	<i>Zelkova formosana</i> Hayata
9	水黃皮	Poonga-oil Tree	<i>Pongamia pinnata</i> (L.) Pierre ex Merr.
10	臺灣欖樹	Flame Gold-rain	<i>Koelreuteria henryi</i> Dummer
11	波斯皂莢	Golden Shower	<i>Cassia fistula</i> Linn
12	無患子	Soap-nut Tree	<i>Sapindus mukorossii</i> Gaertner
13	茄苳	Autumn Maple	<i>Bischofia jabanica</i> Blume
14	楓香	Formosan Sweet Gum	<i>Liquidambar formosana</i> Hance
15	黑板樹	Palimara Alstonia	<i>Alstonia scholaris</i> (L.) R. Br.
16	芒果	Mango	<i>Mangifera indica</i> L.
17	檳榔	Betal palm	<i>Areca catechu</i> Linn



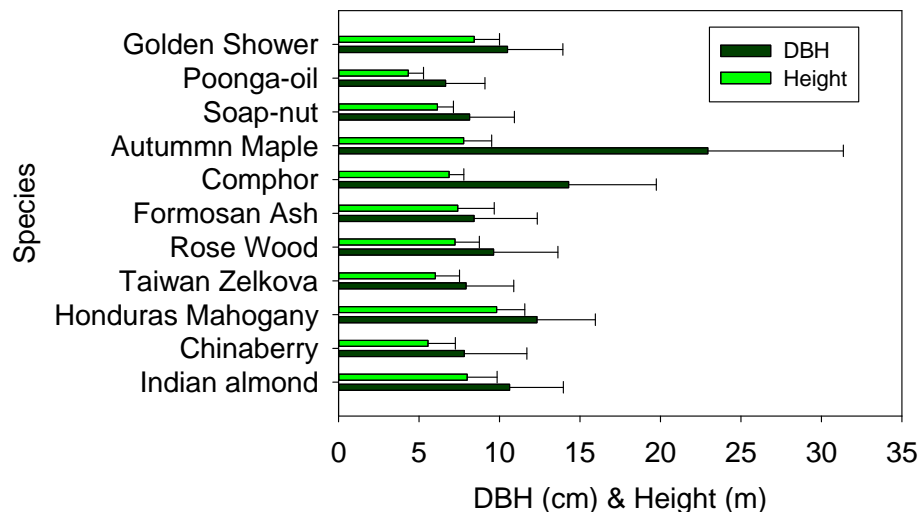
No.	土地利用型	Land use type
18	休耕地	Fallow ground
19	民宅	Building
20	草生地	Grassland

屏東測站



造林資訊:

- 造林年度: 2002-2003年
- 栽植密度: 1,500 trees/ha
- 胸高直徑: 7-24 cm
- 樹高: 4-10 m



土壤資訊:

- 土壤質地: 富含礫石之砂質壤土。
- 土壤有機質成分低且枯枝落葉層極薄。

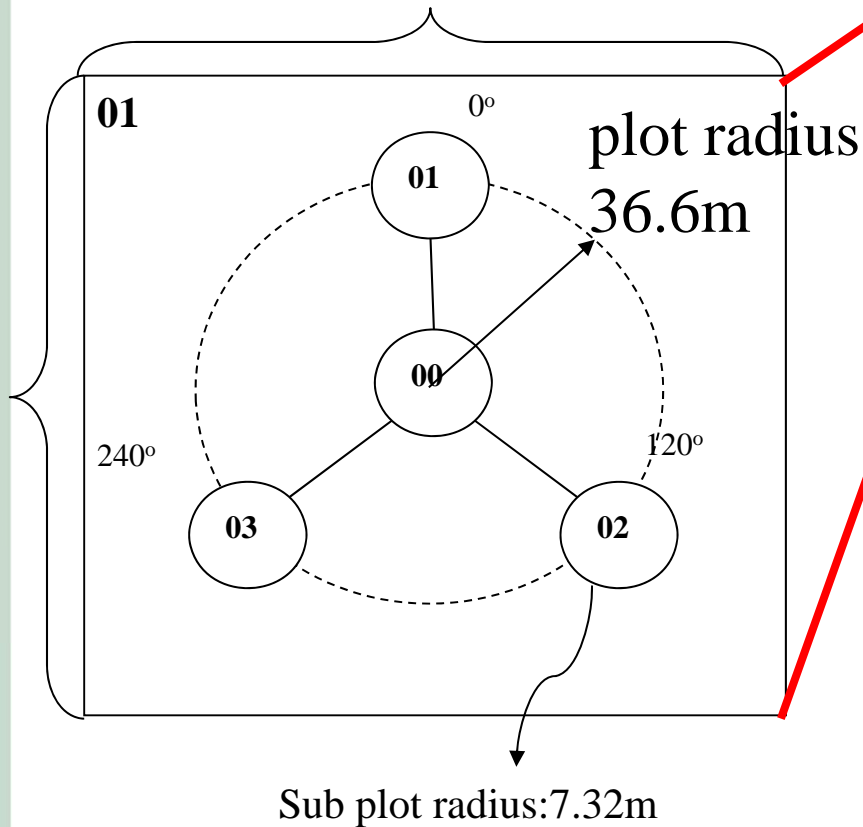


生物計量樣區設置 (兩測站均同)



16 plots were set around flux tower (100 ha); in addition, **4 subplots** were set according to FIA plot design.

250m



Locations of Vegetation Plot at Pingdong



0 125 250 500 Meters



生物計量調查(兩測站均同)



生長量調查



林下植被生物量調查

土壤有機碳調查

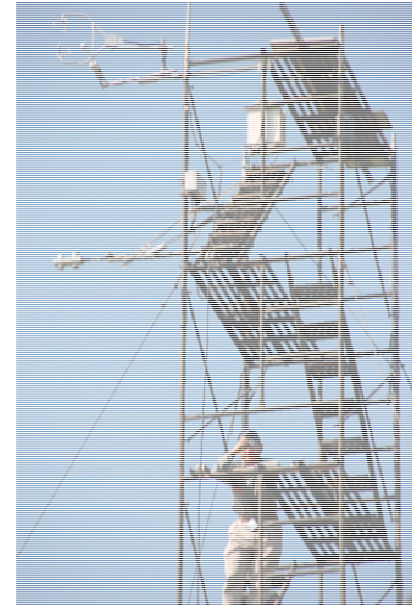
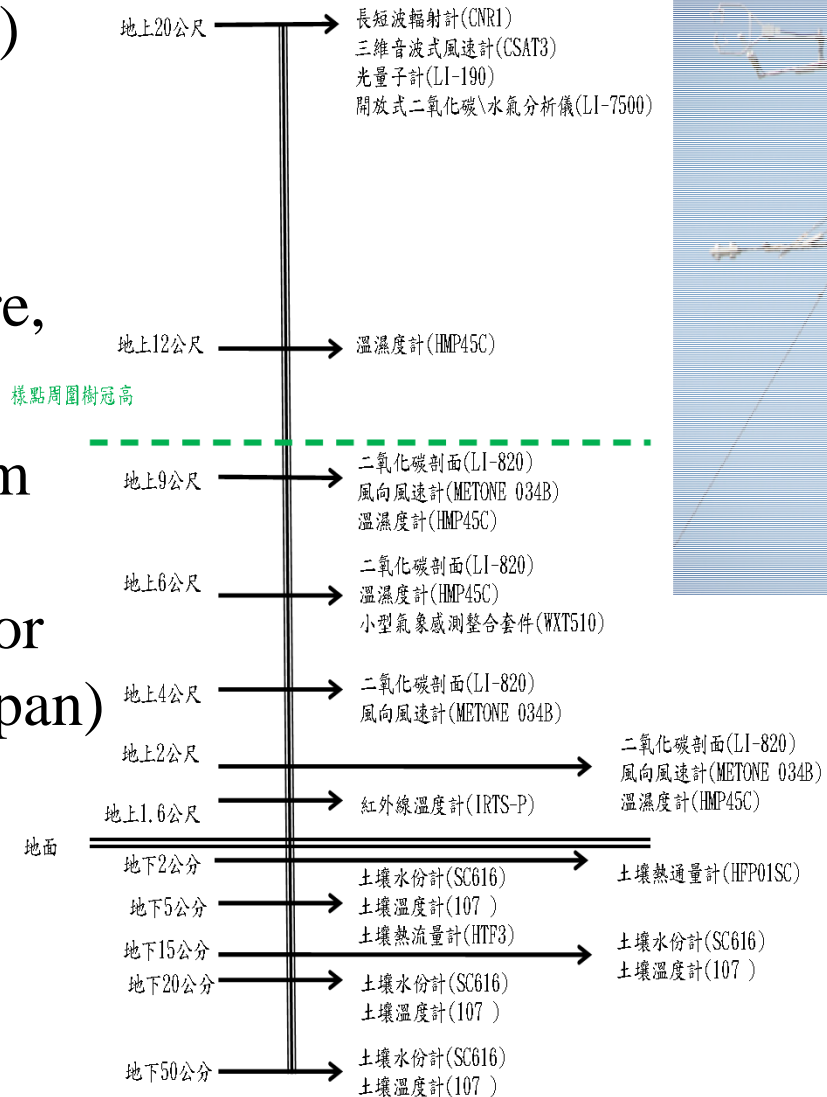
枯枝落葉生物量調查



通量塔觀測項目



- Li-7500 and CSAT3 (20m)
- Solar radiation sensors
- Profile observed system
- Soil heat flux, soil moisture, soil temperature profiles.
- Two soil respiration system designed by Dr. Naishen Liang (National Institute for Environmental Studies, Japan)

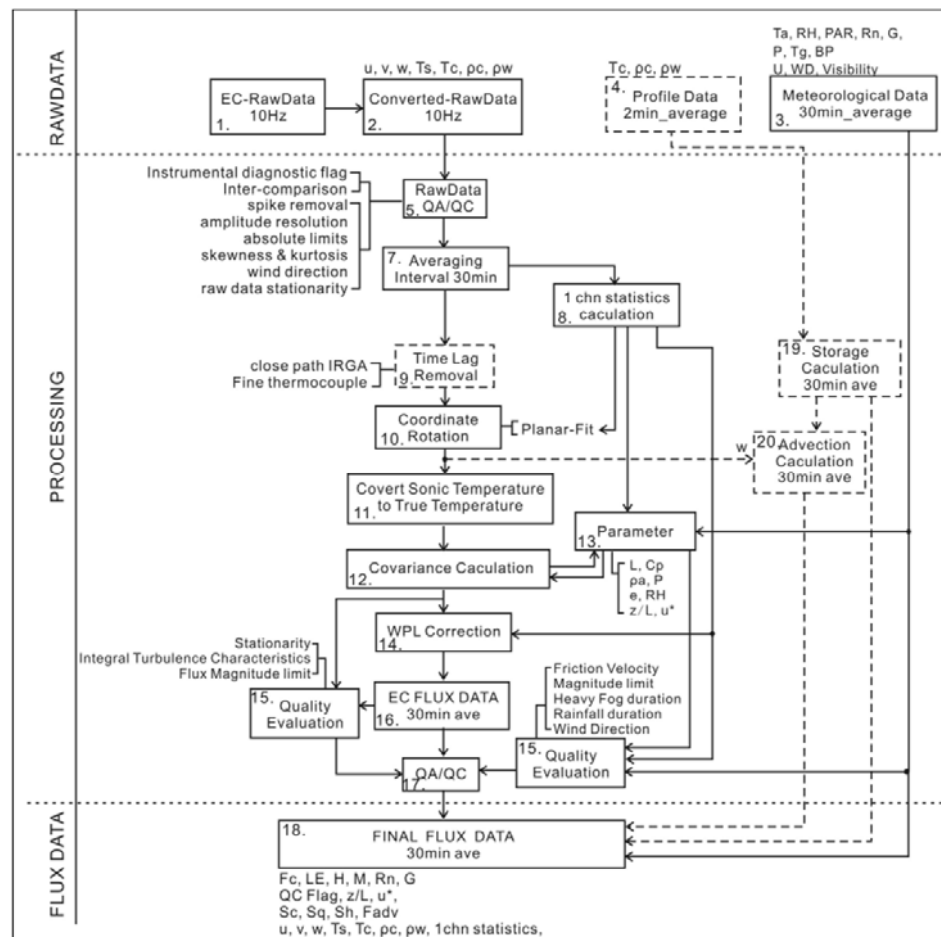


資料檢核程序

(EcoNTU均採同一標準)



- Raw data QA/QC
 - Instrumental diagnostic flag
 - Inter-comparison
 - Spike removal
 - Amplitude resolution
 - Absolute limits
 - Skewness & kurtosis
 - Wind direction
 - Raw data stationarity
- Coordinate rotation
- WPL correction

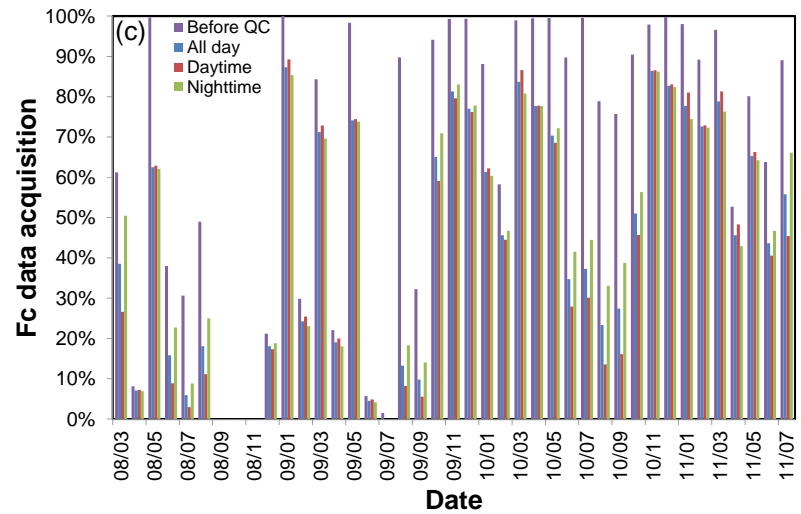
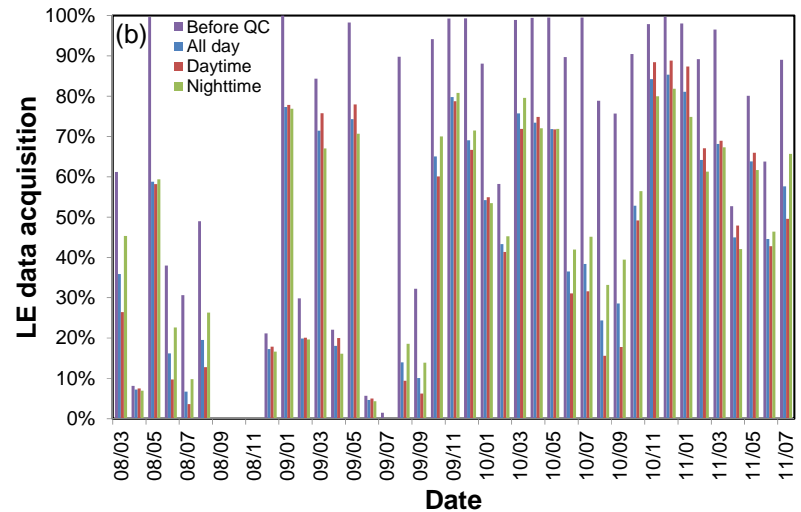
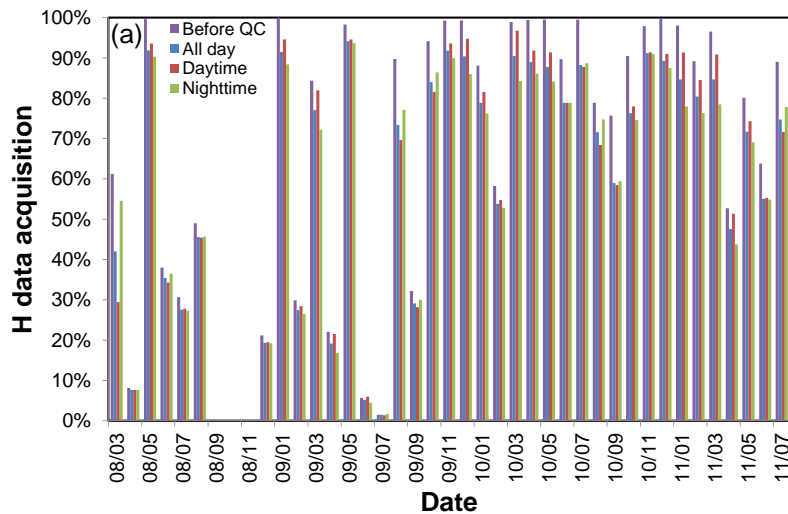


(J.Y. Juang,2010)

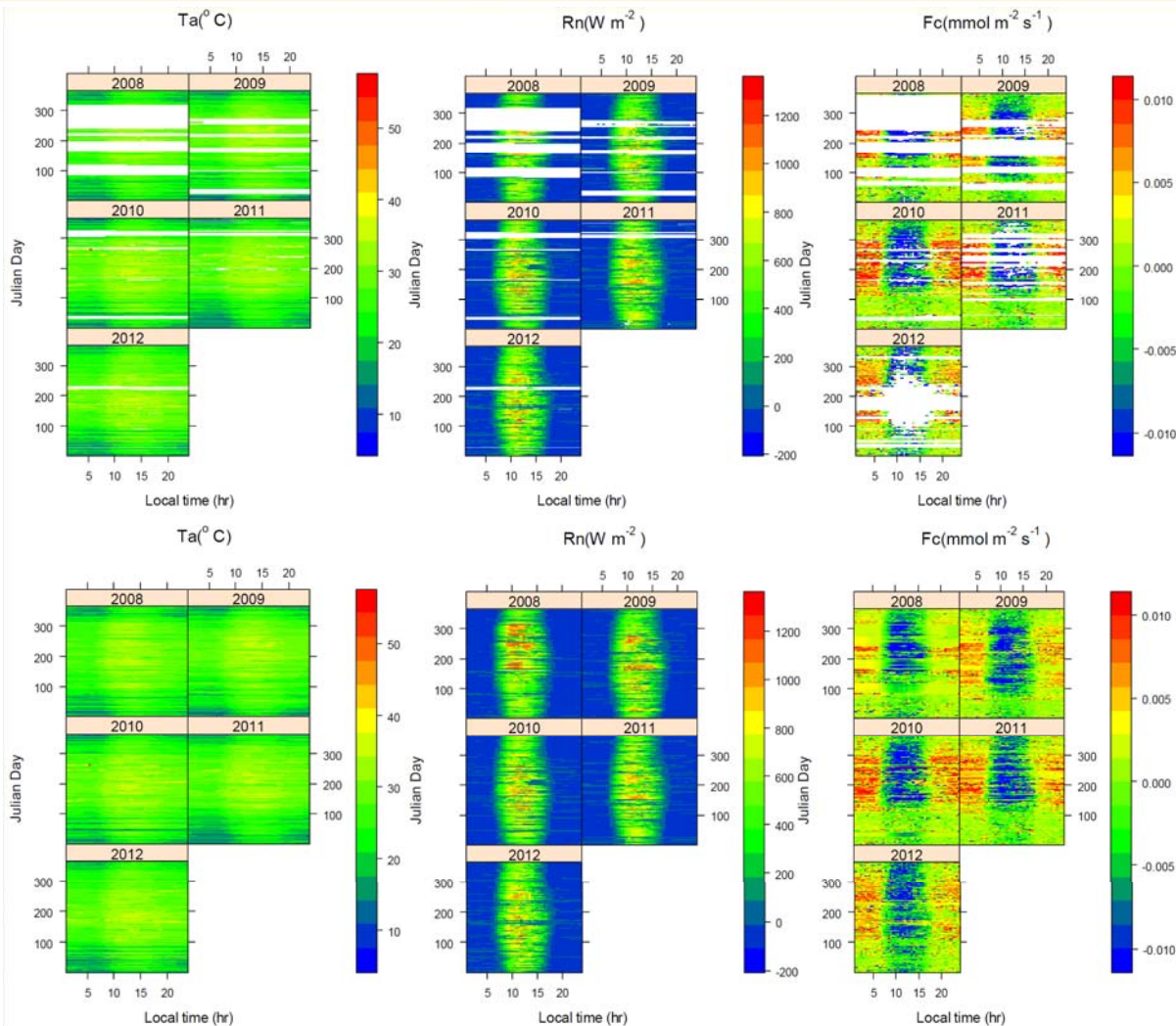
碳通量觀測資料獲取率



- 整年平均資料獲取率達88%。
- 經品質分析控制後：
 - ✓ 可感熱通量：78%。
 - ✓ 潛熱通量：59%。
 - ✓ CO₂通量：61%。

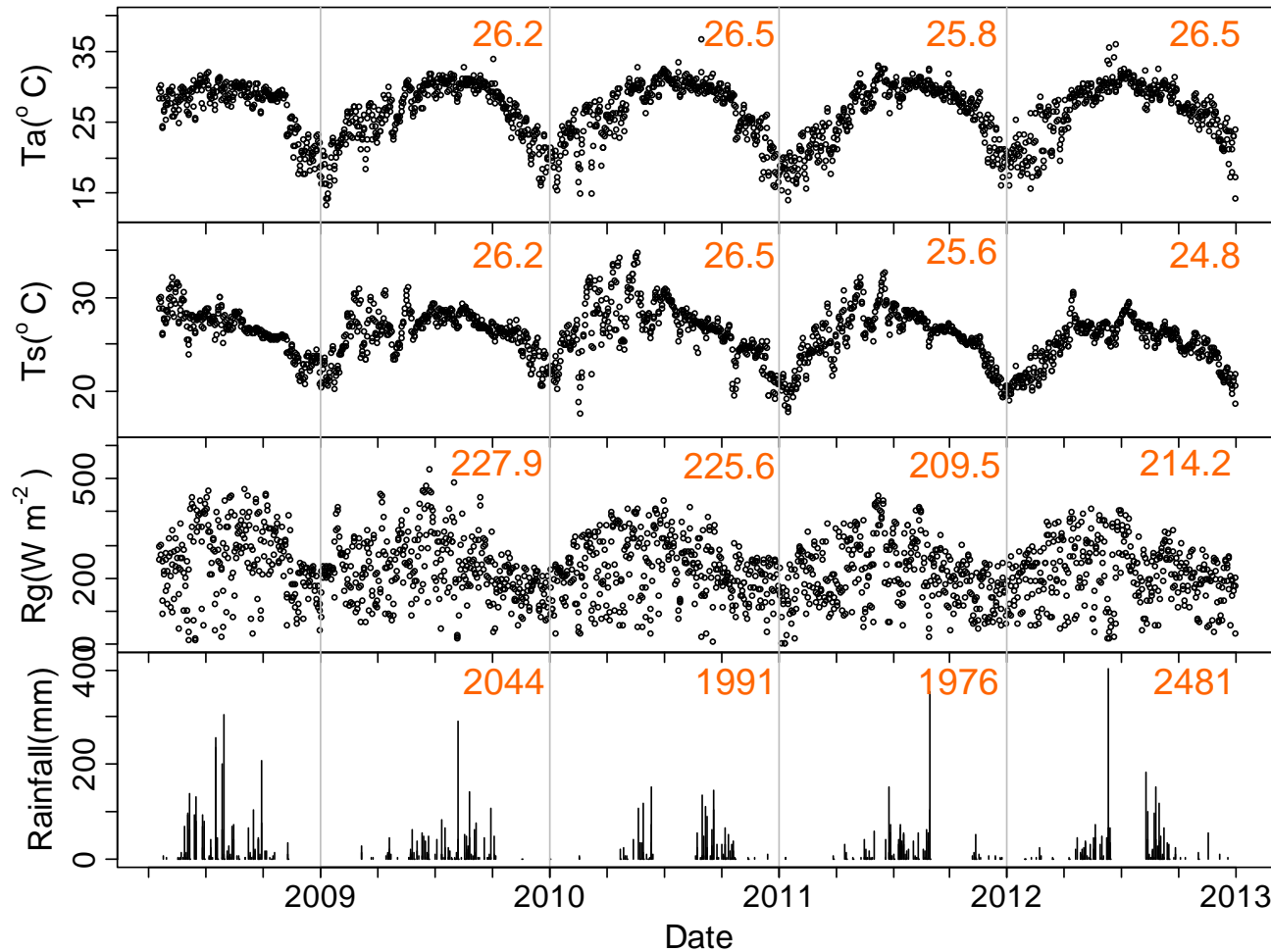


資料補遺(非線性模式)



- 資料遺失的主因：
 - 電力中斷
 - 儀器故障
 - 暴雨侵襲
- 利用試驗地周遭測站逐項進行補遺。

氣候特性

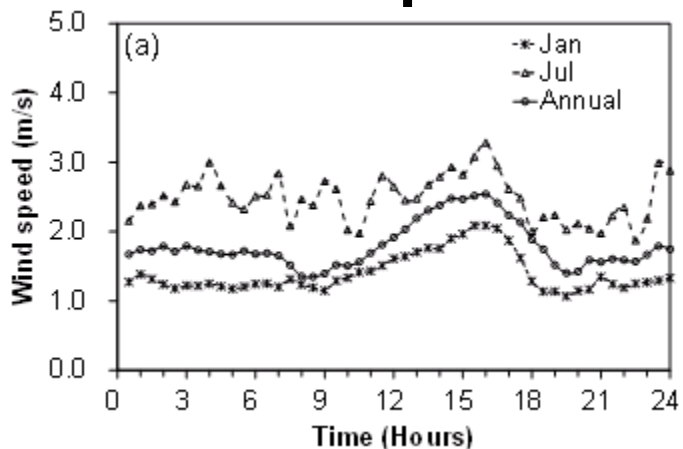


氣溫、太陽輻射年變動不大
年降雨因颱風次數及規模而有較大的變異

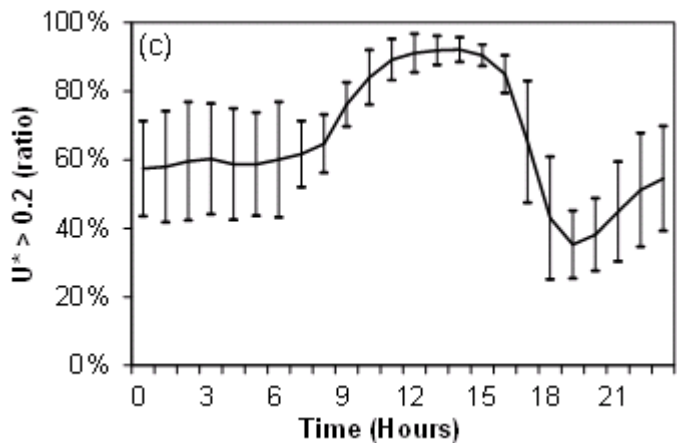
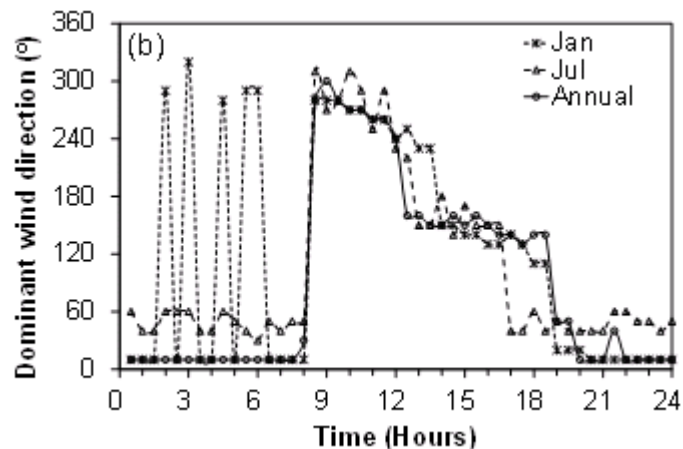
風的特性



Mean wind speed



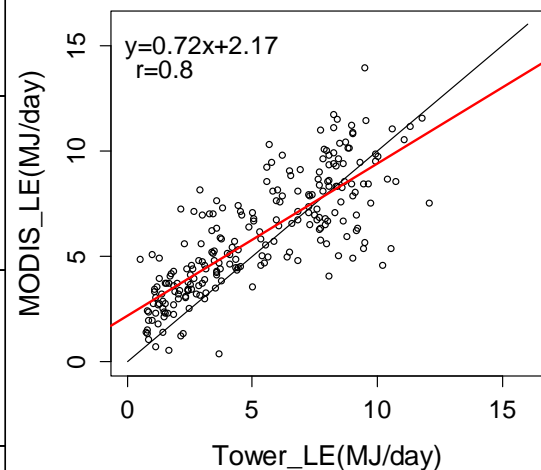
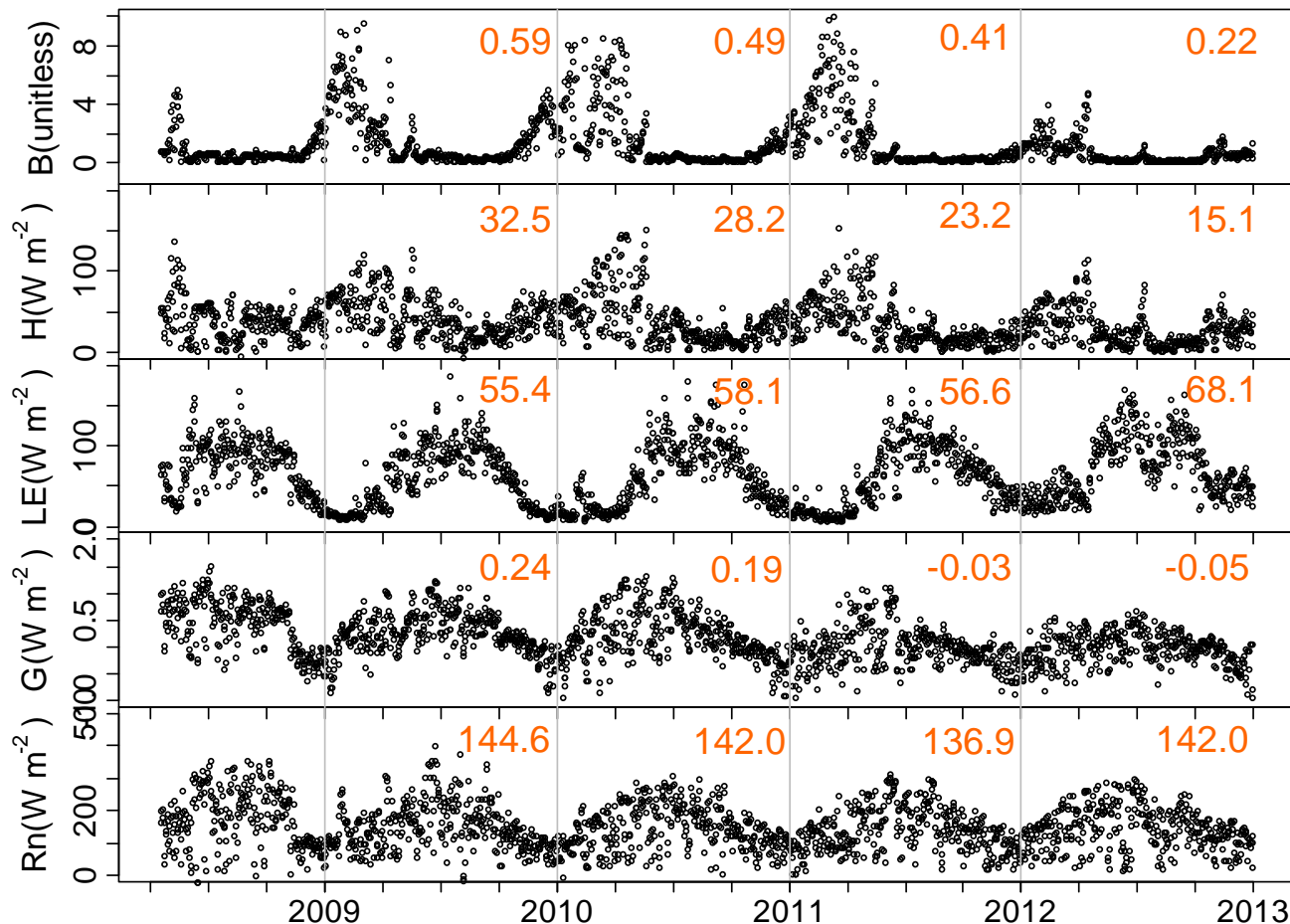
Dominant wind direction



風向受季風及週期性風驅動而變動

Bowen ratio (H/LE)

$$\bar{\beta} = 0.42$$



潛熱觀測結果與MODIS衛星影像估算間有**高相關性**。

夏季為雨季，能量多以潛熱(latent heat)方式釋出，冬季則多以可感熱(sensible heat)方式釋出。

碳通量觀測結果

淨生態系交換量(Net Ecosystem Exchange, NEE)

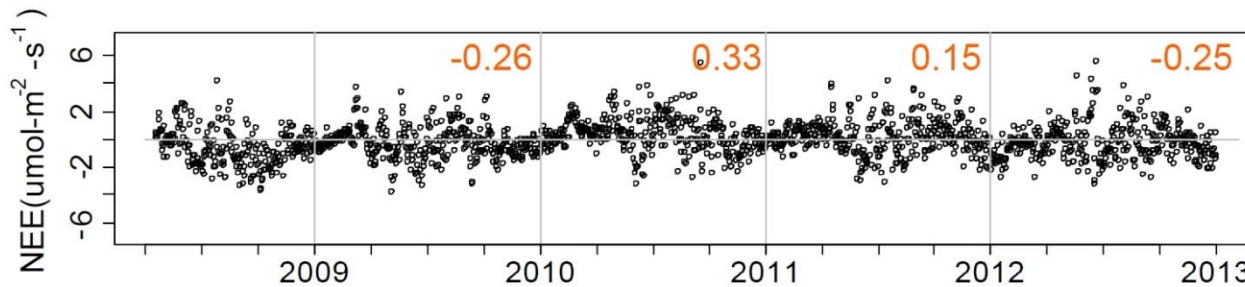
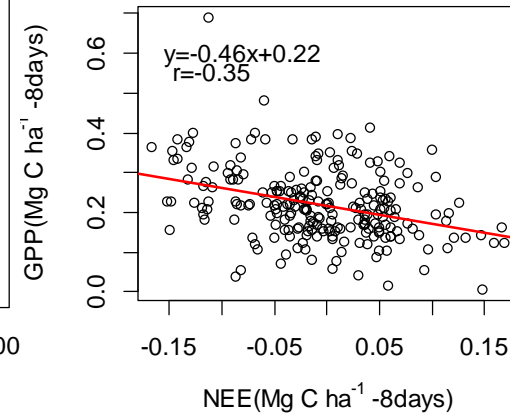
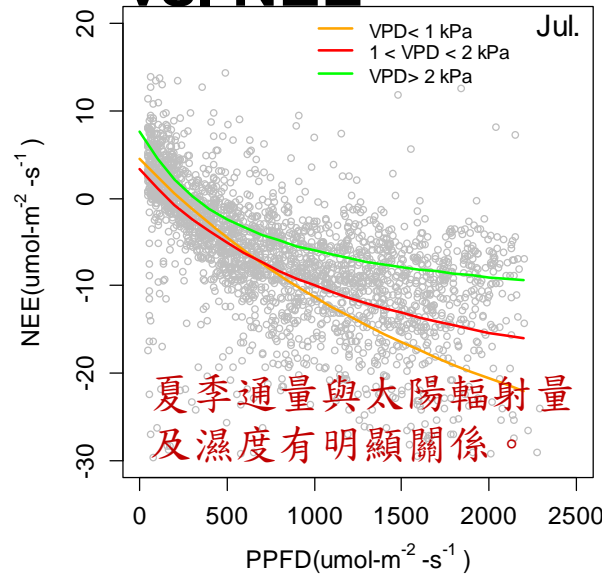
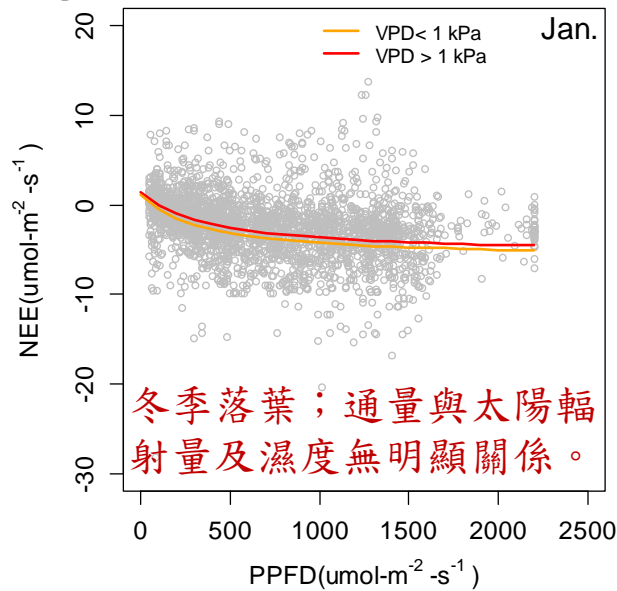


PPFD(Jan., VPD)

PPFD(Jul., VPD)

vs. NEE

vs. NEE



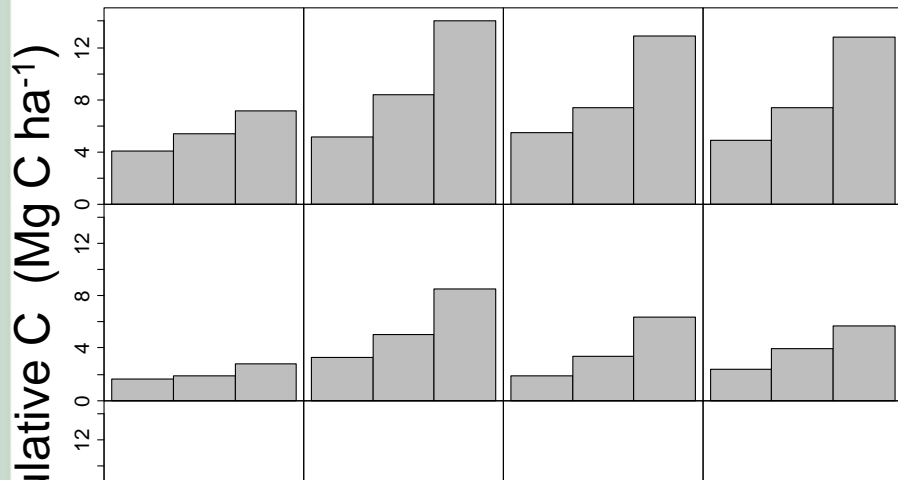
NEE觀測結果與MODIS衛星影像估算之GPP間有線性之關係。

歷年NEE值均小，呈現carbon sink及carbon source震盪

不同樣區幹材碳吸存量



Accumulation (2010-2012)



Annual increment (2011 and 2012)

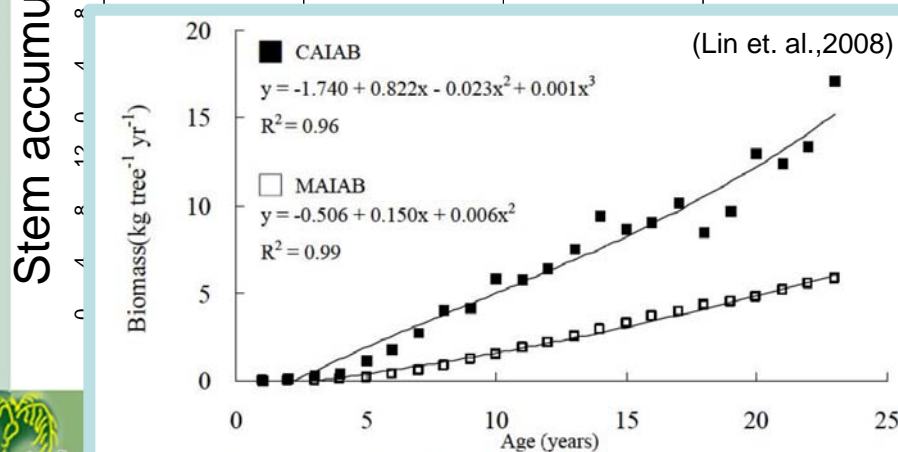
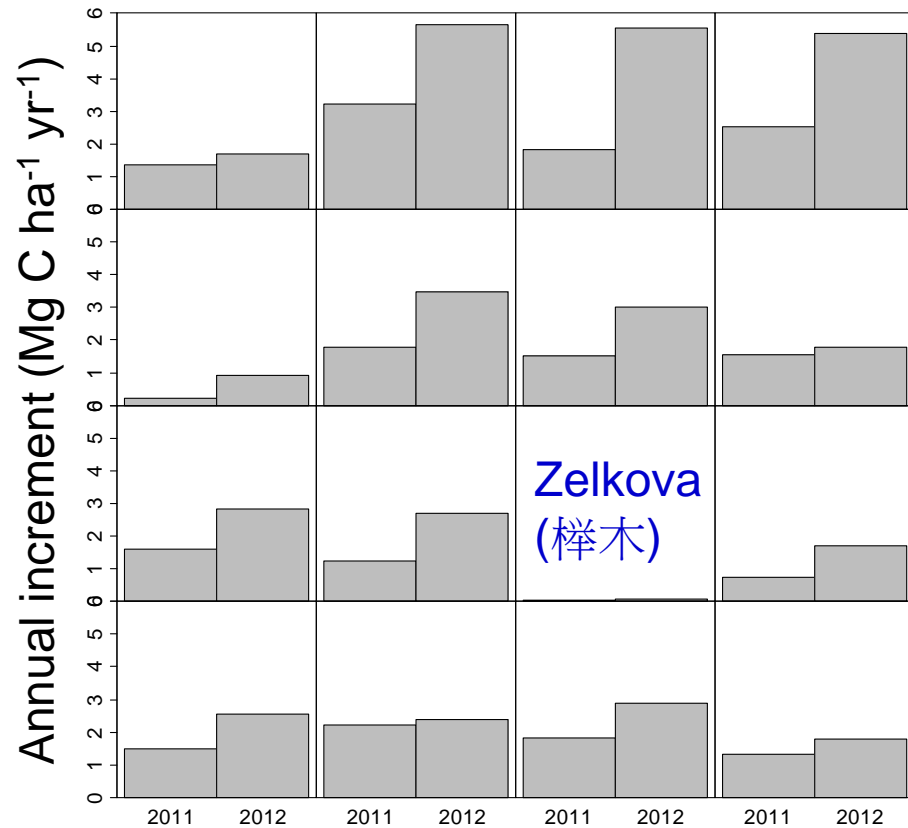
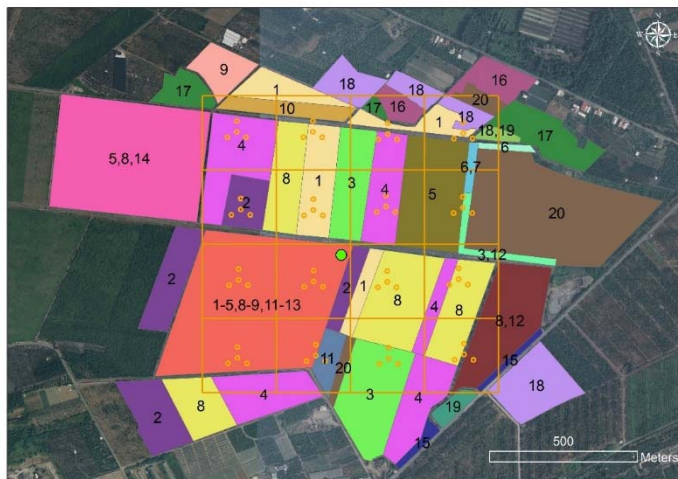
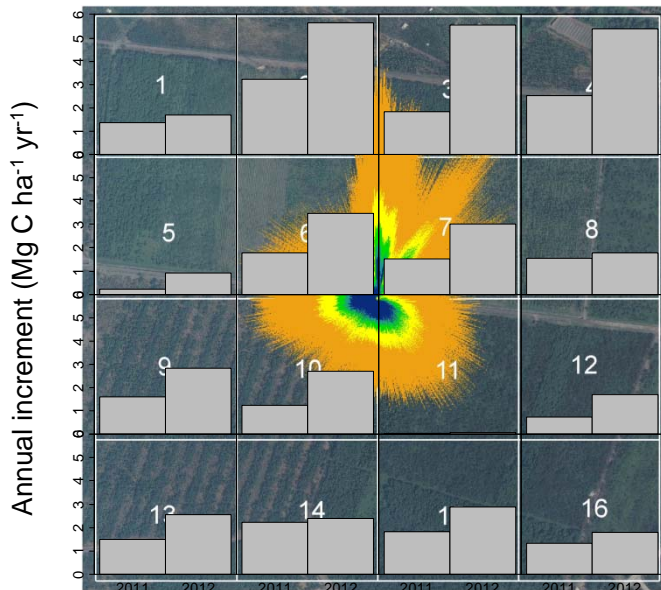
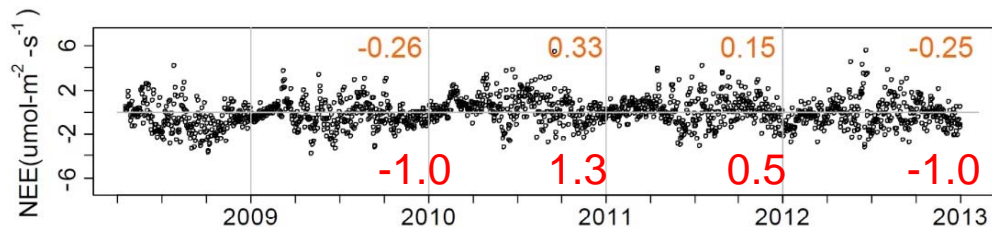


圖5 台東榉木地上部生物量連年生長(CAIAB)和平均生長(MAIAB)



為何立木生長調查結果與通量觀測結果衝突？

Year	2011	2012
Increment	1.53	2.78



Unit: Mg C ha⁻¹ yr⁻¹

- 碳庫之地下部、枯死木分解、枯枝落葉分解及土壤有機質等部分尚未納入評估！
- 日夜觀測碳源差異可能是誤差來源！





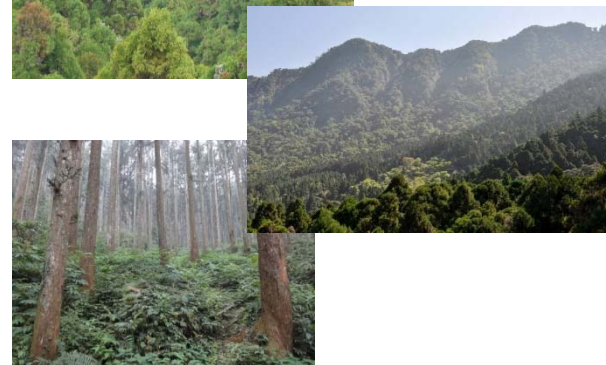
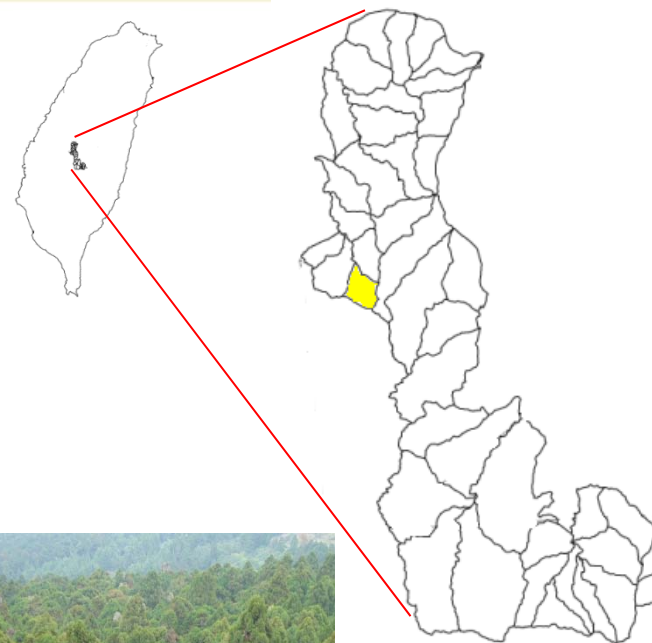
溪頭通量站



溪頭測站簡介



- 依第三次台灣森林資源及土地利用調查資料：**全島林地**面積為2,102,400公頃，占全島總面積之**58.53%**。
- 全島人工林面積為422,600公頃，竹林面積為152,300公頃。人工林栽植樹種，以柳杉、杉木、臺灣杉等樹種為主，其中以**柳杉之面積約41,000公頃(14.72%)**及蓄積量900萬立方公尺(25.38%)，為台灣之人工林之首要樹種。
- **臺大實驗林如同臺灣森林生態系的縮影**，面積達32,786公頃，分佈於海拔200~3952m間，具有豐富且多樣性之林相，氣候帶分佈自亞熱帶、暖溫帶、冷溫帶、亞寒帶、寒帶形成不同垂直植物景觀。實驗林現有人工林面積為14,024公頃，主要樹種為柳杉(3560公頃)，約佔總造林面積之**25.38%**。



溪頭測站



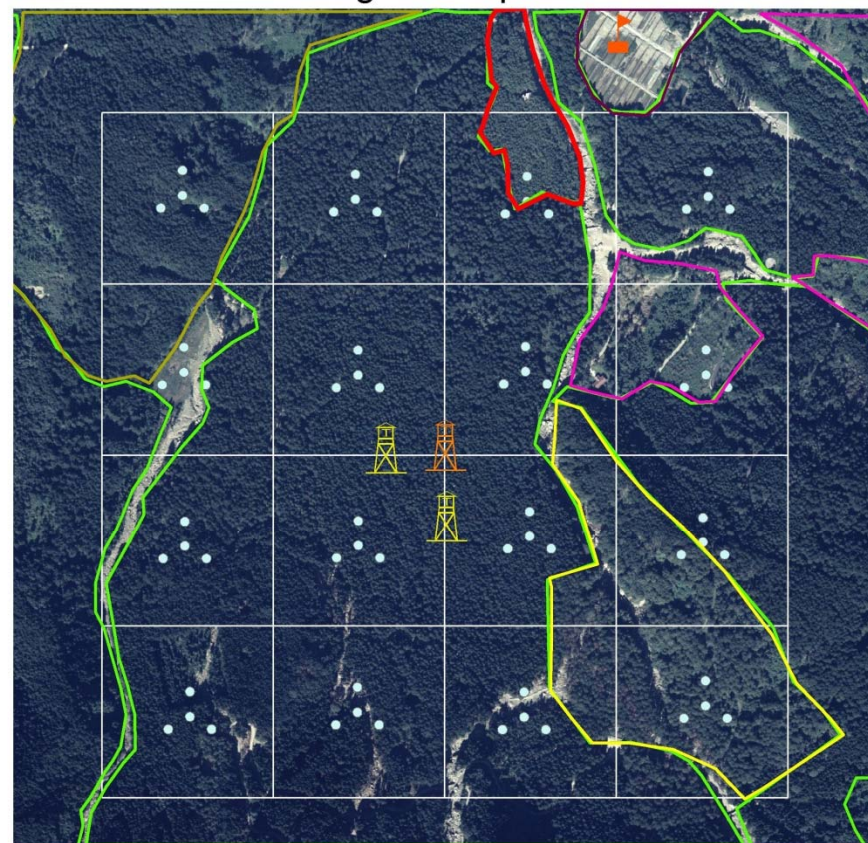
地理資訊:

- 位置:北勢坑溪上游
- 海拔: 1250m
- 平均坡度: 9.4°

造林資訊:

- 樹種:柳杉
- 造林年度:1950年
- 栽植密度: 721 trees/ha
- 胸高直徑:35 cm
- 樹高:28 m

Locations of vegetation plots at Xitou site



Legend

Plots

Japanese cedar

Broadleaf forest

Bamboo forest

Nursery



XT00 Tower



XT01 & XT02 Towers



Agri. Weather Station

Chamaecyparis formosensis

Taiwania cryptomerioides

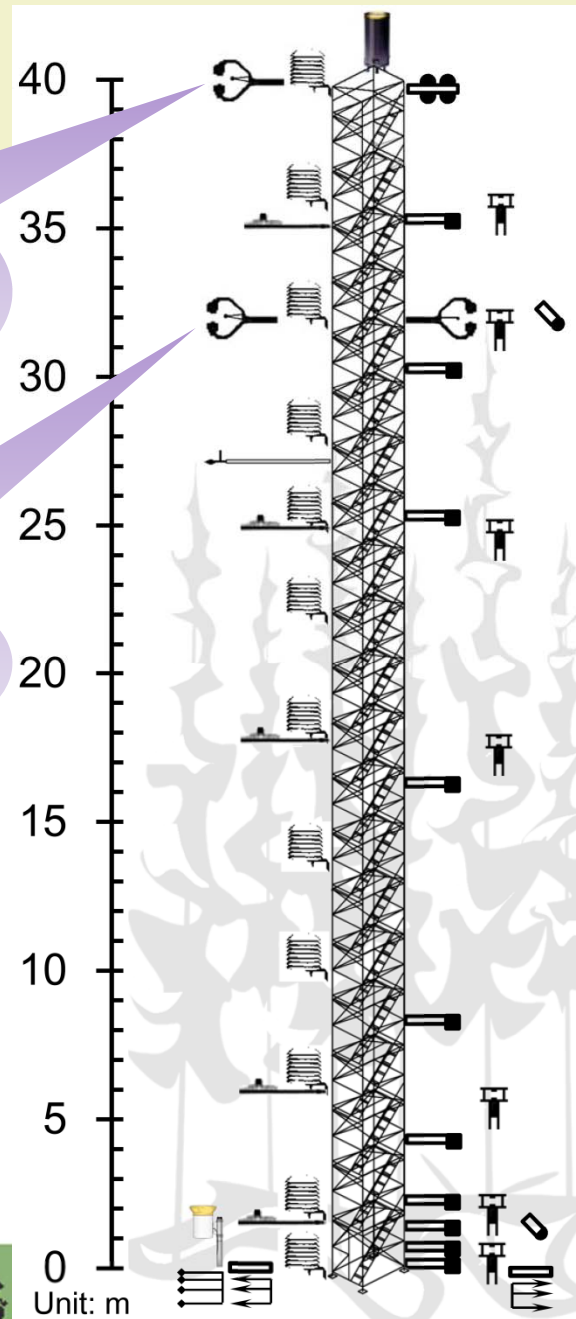


250

250 m

LI-COR 7500
Campbell CSAT3

LI-COR 7500
Campbell
CSAT3

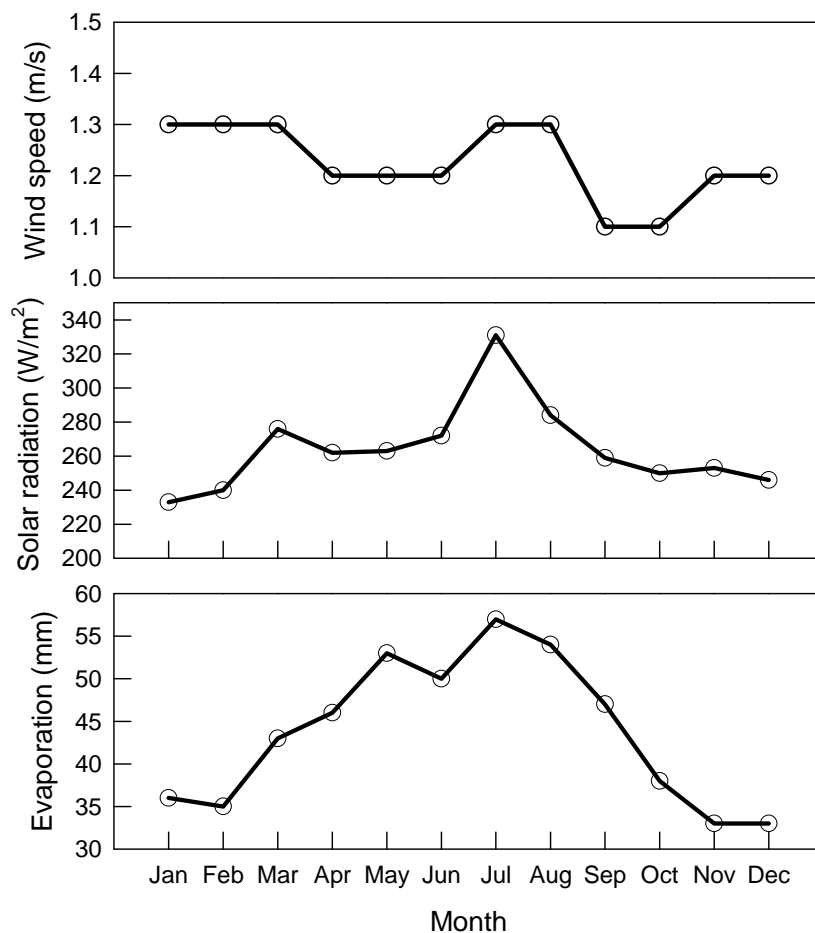
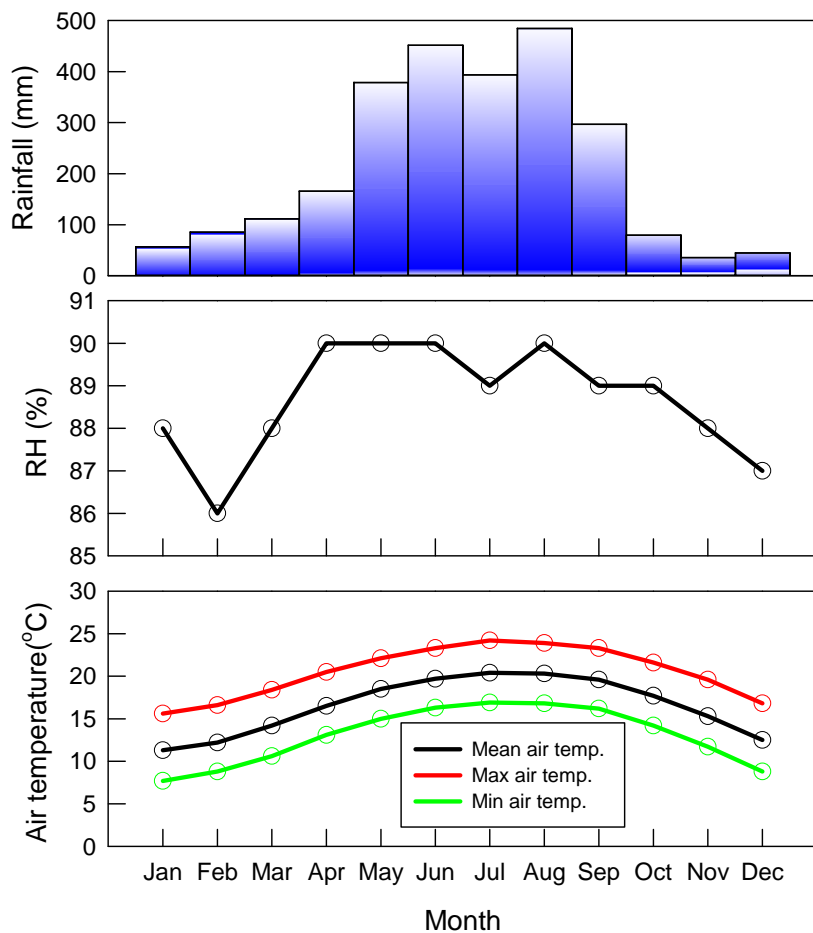


Symbol	Observing elements, sensors and models	Mounted Heights (m)
	Open path system (Campbell CSAT3; Licor LI7500)	32, 40
	Close path system (Campbell CSAT3 & EC155)	32
	Ultrasonic anemometer (Gill WS4)	0.5, 2.5, 6, 18, 25, 32, 36
	Temperature and humidity (Vaisala HMP45C)	0.5, 1, 2.5, 6, 8, 10, 18, 25, 32, 36
	Quantum sensor (Licor Li-190)	2.5, 6, 18, 25, 35
	Net radiation meter (Kipp & Zonen NR-Lite)	12, 35
	Net radiation meter (Kipp & Zonen CNR4)	40
	Soil heat flux sensors (Hukseflux HFP01SC)	0.08
	Soil temperature sensors (thermocouple T-type)	0.15, 0.2 ,0.5
	Soil moisture sensors (Campbell CS616)	0.05, 0.15, 0.2, 0.5
	Infrared thermometer (IRT) (Apogee IRR-P)	1.5, 32
	Rainguage (Ogasawaraeiki N68)	40
	Rainguage (Texas Electronics TE525MM)	0.5
	CO2 and H2O profile system (Licor LI-840)	0.1, 0.5, 1,2, 4,8, 16, 25, 30, 35

長期氣候特性



長年高濕，霧日占全年75.62%(魏聰輝等, 2011)。山谷風顯著。



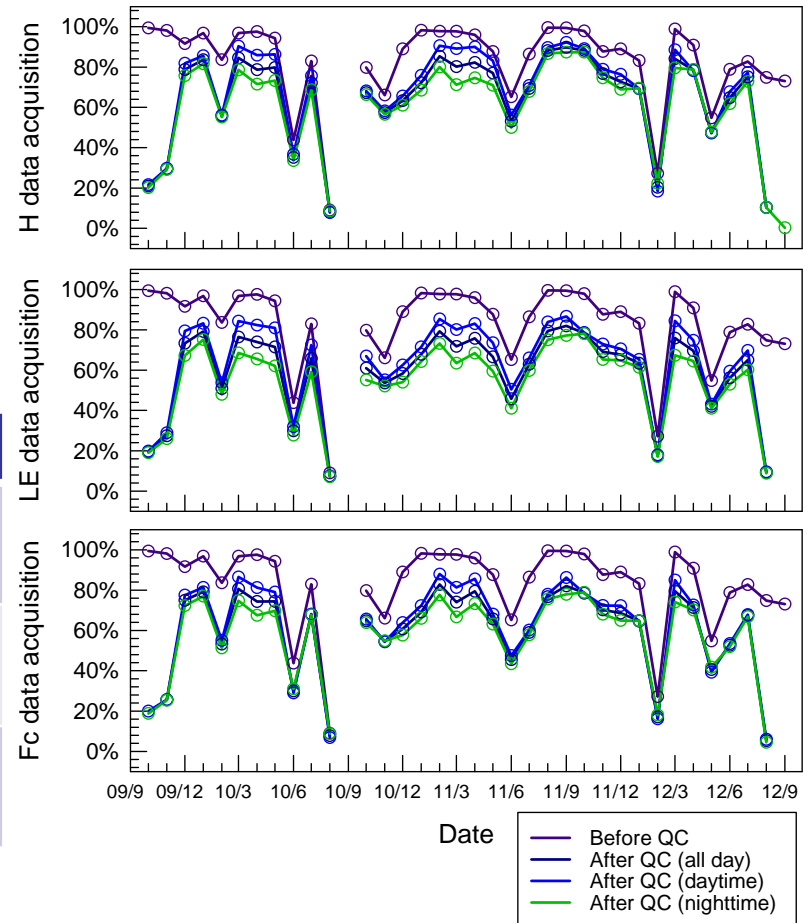
碳通量觀測資料獲取率



- 整年平均資料獲取率達89%。
- 經品質分析控制後：
 - ✓ 可感熱通量：77%。
 - ✓ 潛熱通量：62%。
 - ✓ CO₂通量：62%。

Problem	Solution
暴雨及多霧	增加Campbell EC-155閉路式觀測系統
雷暴雨造成電力中斷	新增防雷擊裝置及不斷電系統(UPS)
儀器故障	增加Campbell EC-155閉路式觀測系統

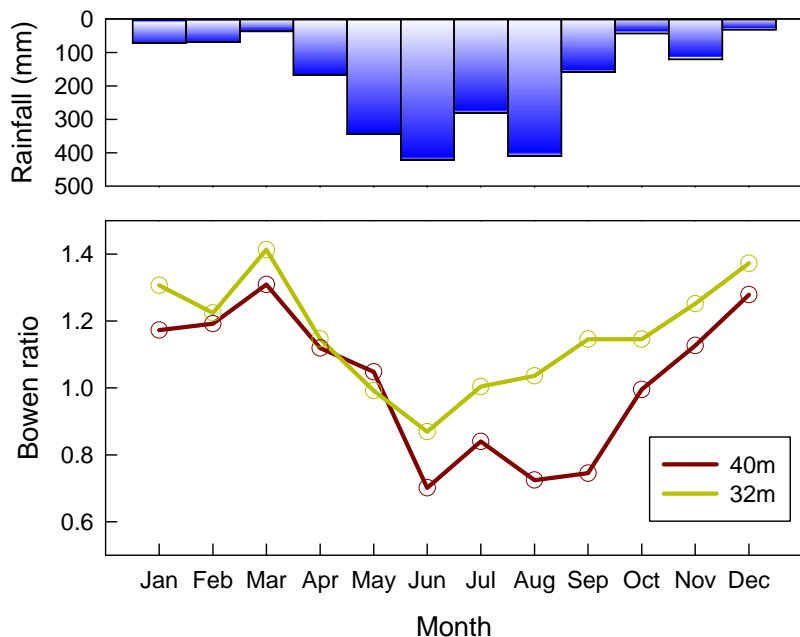
40m high EC system



能量平衡



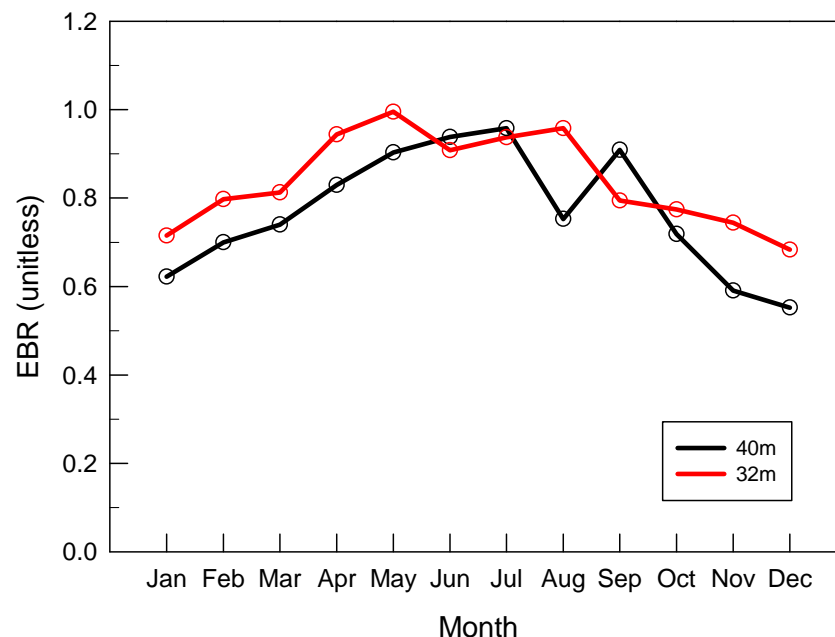
Bowen ratio (H/LE) ($\bar{\beta} = 1.09$)



夏季為雨季，能量多以潛熱(latent heat)方式釋出，冬季則多以可感熱(sensible heat)方式釋出。

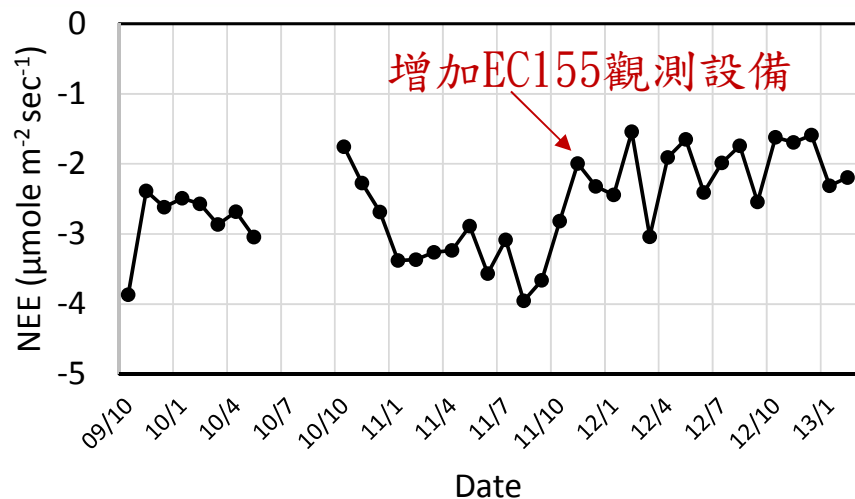
Energy balance ratio (EBR)

$$\sum(H + LE) / \sum(R_n - G) = 0.8$$



夏季較易發展良好紊流，地氣能量交換良好，EBR接近1；冬季可能於晚上的暫存(storage)及泄流(drainage flow)效應造成能量無法被儀器量測，因此EBR較小。

碳通量觀測與生物計量結果



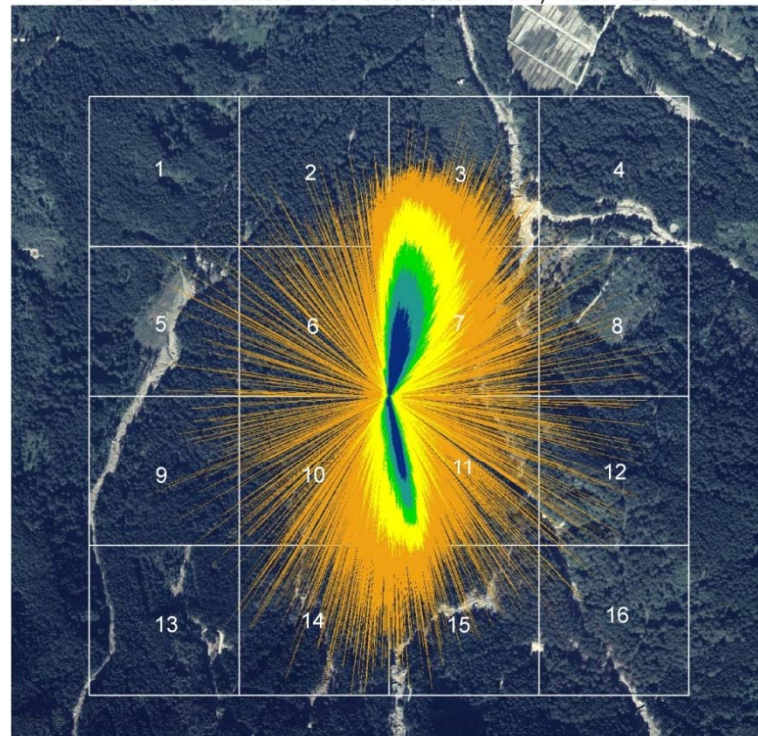
通量塔 (2012)	生物計量調查(地上部碳吸存量)		
	16個 樣區	6,7,10,11 樣區	6,7,10,11樣 區的柳杉
7.62	0.70	3.47	2.45

Unit: $\text{Mg C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$

誤差來源：

- 夜間暫存及泄流效應低估碳的排放。
- 森林碳庫之地下部、枯死木分解、枯枝落葉分解及土壤有機質等部分尚未納入評估！

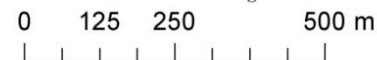
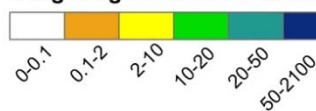
95% contribution of the total flux, 40m sonic



Legend

Plots

Weighting values of 95% contribution



結論與展望



- 通量觀測技術結合嚴謹的現地觀測調查及資料品質檢核驗證程序，可取得可靠的森林生態系碳庫變化。
- 臺灣大學實驗林基於通量觀測技術進行長期監測，以瞭解亞熱帶落葉性闊葉造林地(屏東)及柳杉造林地(溪頭)之生態系碳、水、能量通量變化情形。
- 兩個測站均已進入穩定觀測階段，年均觀測資料獲取率約61%，已達國際測站觀測水準。觀測結果仍須依分別進行必要之修正。
- 明年將配合Lidar進行現場精確地上部生物計量調查，未來可提供合理的估算結果，供AFOLU第1、2層級估算檢核之用。
- 臺灣大學整合型研究計畫(EcoNTU)針對數個臺灣典型的森林碳庫進行觀測調查，未來配合遙感探測技術將可建置地景尺度碳庫吸存模式，提供林業永續經營參考。

A low-angle, upward-looking photograph of a tall, slender metal tower or observation deck situated in a dense forest. The tower is the central focus, extending from the bottom center towards the top of the frame. It has a complex lattice structure with several levels of platforms. The surrounding trees are tall and thin, their trunks converging towards the top of the image, creating a strong sense of height and perspective. Sunlight filters through the canopy, creating a bright, hazy atmosphere. Overlaid on the center of the image is the text "Thank you for your attention" in a bold, yellow, serif font.

**Thank you for
your attention**

溪頭通量塔



主塔 (XT00)

塔高:40m

建置日期: 2008年年底

副塔(XT01)

塔高:32m

建置日期: 1971年

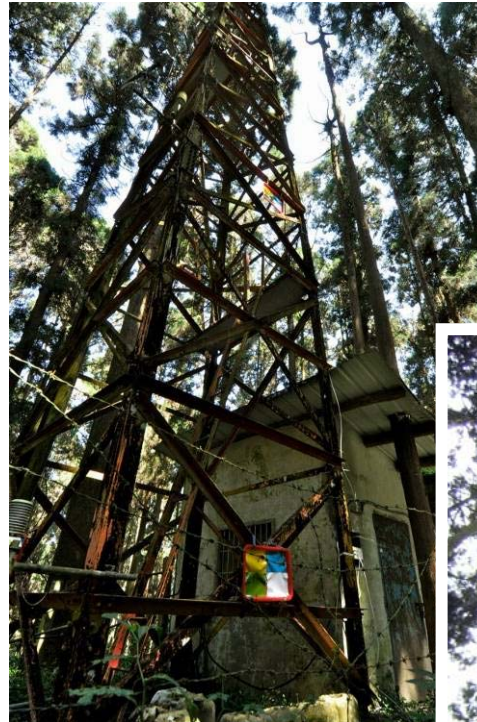
位置: 主塔南邊56m

副塔(XT00)

塔高:40m

建置日期: 2011年初

位置: 主塔西邊62m





Sub tower
(XT01)

Main tower
(XT00)

Sub tower
(XT02)

Conferences held at NTU Experimental Forest



- 2008 International Symposium on CO₂ Flux Monitoring Technology, Dec 16-19 2008
- 2010 International Symposium on Forest CO₂ Flux, Dec 6-7 2010
- 2012 International Conference on Global Change, Forest Adaption and CO₂, Water and Energy Flux Monitoring, Dec 17-21, 2012



2008



2010



2012