

農業氣象的目的和內容

張 鏡 湖

中國文化大學

摘 要

農業氣象是研究氣象與水文對農業影響的一門學問。農業氣象的問題可以歸納為四大類：(一)土地利用的規劃，例如在某一區域選擇在生態上適合而經濟上有利的作物或農業制度。或在一大區域中挑選對某一作物生長最適宜的地點。(二)耕作方法，例如決定種植和收穫的時間、灌溉、施肥、覆蓋、休閒、遮蔭、混作等措施。(三)氣象對作物生長的影響，例如作物從發芽經營養生長，開花，到結實的物候(phenological)發展期，以及光合作用，呼吸作用，轉移(translocation)，蒸騰等物理和生理的過程。(四)災害之防護，例如凍害、洪泛、乾旱、風害、土壤侵蝕及引起病蟲害之特殊氣候等。

農業氣象問題的研究，橫跨氣象、水文、土壤物理、植物生理、農藝等學科的領域。在氣象方面包括：(一)綜觀(synoptic)尺度和長期天氣預報；(二)微氣象的研究；和(三)氣象要素區域性分佈的分析，尤其受地形的影響。在生物方面，許多對作物生理和發展過程的知識，來自人工氣候室(phytotrone)和田間實驗。

微氣象研究

氣象局的主要任務是天氣預報。預報所需要的資料包括：氣壓、空氣溫度、風向、風速、濕度、雨量、雲量及能見度等，高空的觀察極為重要。微氣候的研究用不著氣壓和能見度，但是第一級(first order)農業氣象站的測量應該有各種輻射的項目，土壤濕度、蒸發量、土壤含水量，甚至於有測量露的儀器。因為研究人員的專業訓練和研究方法不同，許多國家微氣象和農業氣象的研究屬於農業部而不屬於氣象局。世界上許多國際性的農業研究中心，例如在菲律賓的國際稻米研究所(International Rice Research Institute, 簡稱IRRI)，在哥倫比亞的國際熱帶農業中心(International Center for Tropical Agriculture 簡稱CIAT)，在奈及利亞的國際熱帶農業研究所(International Institute of Tropical Agriculture 簡稱IIAT)及類似約十所機構，都有相當完整的微氣象儀器和農業氣象研究計畫。

我國微氣象之研究起步較晚。一九八二年中央氣象局在嘉義設立農業氣象研究室，開始購置精密之儀器測量全天空輻射量(global radiation)漫射輻射，淨輻射，風速剖面，土壤熱通量等項目。嘉義測站為臺灣目前唯一稍具水準之微氣象研究中心。

一九八三年經濟部能源委員會委託中央氣象局蒐集臺灣地區太陽輻射資料，設置八

個自動紀錄測站，觀察垂直直達日射 (direct normal solar radiation) 及全天空輻射量。

輻射紀錄

根據八個全天空輻射測站及二十四個日照時數測站之紀錄所繪製之太陽輻射分佈圖，顯示臺灣地區輻射能量遠低於其他熱帶地區 (張鏡湖 1986)。臺灣全島全年平均輻射量約每日三百朗勒 (langleys 即 cal/cm^2 1 langley = $697\text{W}/\text{m}^2$)，僅相當於加拿大之南部之平均量，臺灣東南部最高，每日平均超過四百朗勒，北部最低僅二三八朗勒。太陽輻射能量之低落，壓抑光合作用，對 C_4 作物產量之影響，尤其顯著。

臺灣地區僅嘉義站有可靠之漫射紀錄。根據該站漫射與全天日射量紀錄之分析，對於臺灣漫射量之分佈有一初步之瞭解 (張鏡湖 1988)。一般而言，臺灣漫射所佔全天空輻射量之比例極高。漫射量之測定有助於山坡地輻射量與光合作用有效輻射量 (photosynthetically active radiation 簡稱 PAR) 之計算。山坡地之輻射必須將直達日射與漫射輻射分別計算。臺灣所屬 20°N 至 25°N 之坡地輻射季節性之變化，僅有一初步之估計 (張鏡湖 1986)。進一步之研究對臺灣山坡地土地利用之合理規劃，極具參考價值。

臺灣僅有零星之淨輻射 (net radiation) 紀錄，無法確立淨輻射與全天空輻射量間之關係。淨輻射為蒸發之主要能量來源。例如最正確而普遍用以估算蒸發之 Penman 公式 (Penman 1948)，即需要淨輻射。淨輻射自海平面至高山之變化亦有待研究。

作物之分佈

所有作物的氣候需求具有其臨界 (critical) 與最佳 (optimum) 的條件。Nuttonson (1947) 用最高和最低溫度，霜期以及月平均雨量來決定各種穀物的「類比氣候」 (Climatic analogues)。此一方法所需氣候資料在臺灣頗為齊全，已經繪製成圖 (郭文鑠與楊之遠 1984)。

蘇聯和中國大陸學者常用度日 (degree-day)，或每日溫度超過某一低限之累積，來分析作物的發育和分佈。但此種方法極為粗淺，不足以用為作物土地利用之標準。就生態環境而言，作物的分佈常決定於太陽輻射，光周期 (photoperiod)，夜溫，風速等因素。從經濟效益而言，必須考慮到在某一氣候下，作物產量的最高潛力。

就溫度而言，生長季平均溫度 23°C 至 24°C ，日夜溫差 10°C 對鳳梨生長最為適合。Neild 與 Boshell (1976) 認為臺灣氣候條件不及世界大多數鳳梨產地。根據 CIAT (1978) 之研究，各種菜豆 (common beans) 開花期溫度在 20°C 至 22.5°C 之間最為理想，最高不能超過 25°C ，最低不低於 17.5°C 。此為選擇菜豆種植地區之標準。

有些作物之分佈決定於夜溫，例如澳洲胡桃 (macadamia nuts) 夜溫在 15°C 至

18°C 之間，開花繁盛，夜溫超過 21°C 即不開花，亦不結果。

日長對大豆品種之分佈影響最深，為衆所周知。甘薯開花與塊莖之生長以十一時至十三時之日長最好。大多數洋蔥品種需要日長較長，才會生長較多之鱗莖。

香蕉之種植應該避免積水和強風的區域，鳳梨為 CAM (Crassulacean acid metabolism) 作物，白天氣孔關閉，蒸騰量僅為普通作物三分之一，因此適合較乾燥之地區。

作物產量

第二次大戰以後，對於作物生長研究之重點在光合作用。利用葉面對太陽輻射之反應，陽光在葉冠 (canopy) 內之分佈，輻射日變化及呼吸量等資料估計有機物之生產量。此類研究可以 Monteith (1965) 與 de Wit (1965) 為代表。Loomis 及 Williams (1963) 並以此計算理論上作物最高生產量。

產量成分的分析

光合作用在作物生長 (growth) 的過程中，製造了所有的有機物，但是經濟產量 (economic yield) 僅是其中極小的一部分。估計經濟產量，必須分析作物體內各種成分的組成 (Yield Component analysis)。例如稻米的產量決定於：每一單位面積穗 (ear) 的數目，每一個穗包含多少小穗 (Spikeler)，結實率 (ripening ratio) 和千粒重。穗數的多寡又視早期分蘖 (tiller) 的情形而定。每一組成成分形成的時期不同，而各時期各種氣象因素的相對重要性亦有所變異。

根據 IRR I 在許多熱帶地區實驗的結果。證實稻米成熟期的平均溫度以 21.5°C 最為適中。低於此一溫度，轉移作用太弱。高於此一溫度，呼吸作用太強。熱帶地區通常溫度高於 21.5°C。在水分和肥料供應充足的情形下，開花前二十五天的溫度和輻射對稻米產量的影響最大。最高產量可以下列公式表示之 (Yoshida 1977)：

$$Y = S (278 - 7.07 t) \times 0.86 \times 1.81 \times 10^{-5}$$

Y 為稻米產量 (公噸 / 公頃)，S 為開花前二十五天之太陽輻射 (朗勒 / 日)，t 為同時期之溫度 (°C)，0.86 為平均結實 (filled grain) 之百分比，1.81 為平均千粒重。

在冷帶地區的日本，也得到類似的結果 (Murata 1975)：

$$Y = 1.20 S - 0.021 (t - 21.5)^2 S$$

在日本 39°N 以南之地區，太陽輻射在成熟期較為重要，而在 39°N 以北之地區，成熟期之前較為重要。

發育期與產量

光合作用與產量成分的分析並沒有考慮到作物發育階段 (development stage) 的長短。Duncon (1975) 對於生長與發育的不同有如下的解釋：在 10°C 時光合作用和發育都非常緩慢。兩者在 30-33°C 時最高。但是光合作用決定於白天的葉面溫度，而發育的快慢決定於全天的平均溫度。因此日溫相同而夜溫較低的地區發育較慢，夜溫高則發育快，發育期短則光合作用總量減低，作物 (經濟) 產量也隨之減低。稻米的成熟期在菲律賓約為三十天，在日本北海道最長達六十五天。Peters 等人 (1971) 在美國伊利諾 (40°N) 比較兩塊實驗田，其中一塊晚間被封罩後加熱，夜溫從 18.3°C 增加到 29.4°C，其他情形完全一樣。結果加熱的玉米、小麥和大豆的產量分別減少了百分之四十、五十和十。在許多熱帶地區夜溫都經常超過 25°C。減產的主要原因，就是在高溫的情形下，成熟期縮短。

1983 年至 1985 年 IRR I 和世界氣象組織 (World Meteorological Organization 簡稱 WMO) 共同進行一項大規模的稻米產量研究計畫 (Oldeman et al. 1987)，即兼顧氣象對生長和發育兩方面的影響。該計畫在十六個國家二十三個地點進行田間實驗。包括屏東和南京不同季節和年份的生長情形。根據其中三十九次實驗結果 (第一表)，得到下列關係：

$$Y = 4.8 + 0.5743 (DNB - 3.1) - 0.1492 (TDB - 28.1) \\ + 0.06384 (RSB - 30.446) + 0.1665 (RSC - 13.964) \\ - 0.1327 (TNC - 24.0)$$

Y = 產量，實驗平均為 4.8 噸 / 公頃

DNB = 開花前日夜溫差，平均 3.1°C

TDB = 開花前日溫，平均 28.1°C

RSB = 開花前輻射總量，平均 $30.466 \times 10^3 \text{ m Wh } / \text{ cm}^2$

RSC = 開花後輻射總量，平均 $13.964 \times 10^3 \text{ m Wh } / \text{ cm}^2$

TNC = 開花後夜溫，平均 24°C

此一公式證明開花前白天高溫超過 28.1°C 和較小的日夜溫度差對產量不利。開花前之輻射總量影響圓錐花序之數目。但以同樣之能量而言，輻射在成熟期影響結實率和千粒重，更為重要。成熟期的持續時間與夜溫成反比。

一般而言，稻米產量溫帶高於熱帶，主要原因即為熱帶夜溫太高，成熟期太短。實驗中南韓之密陽 (Milyang) 和水原 (Suweon) 成熟期自四十一天至五十四天不等，而熱帶最短的祇有十九天。熱帶的高山地區，夜溫降低，產量甚高，可以哥倫比亞海拔一千餘公尺之帕米拉 (Palmina) 為代表。沙漠地帶陽光充沛，夜間少雲，長波輻射強烈，夜溫偏低，實驗中產量最高之埃及沙克哈 (Sakha) 即具此特徵。相反的，在潮濕熱帶，雲量高，陽光不足，日夜溫差小。因此錫蘭帕蘭薩 (Paranthan) 產量不及埃及

沙克哈三分之一。由於同一理由，熱帶稻米產量乾冷季節高於濕熱季節。第二表中，屏東實驗結果，二期稻每叢圓錐花序之數目僅為一期稻作百分之六十，而產量不及一半，足證氣象因素之重要。

其他作物產量之分析

各種作物對不同氣象因素之反應不一，必須確定其最主要之氣象因子，始能建立一正確之模式，然後以實驗加以證實或修正。

決定雜糧玉米產量最重要之一因素為日長 (Chang 1981)，日長低於十四小時三十分鐘的熱帶區域雜交玉米生長較差，兼以受夜溫太高的不良影響，玉米在熱帶實驗田中最高產量僅約每公頃六噸，而高緯地區如南韓可達十二至十四噸。玉米量 C₄ 作物，飽和光強度 (Saturation light intensity) 極高，臺灣輻射量太低，亦為不利之一因素 (楊之遠 1986)。

根莖作物必須維持供源 (Source) 與受源 (sink) 間之平衡，供源為產生光合作用之葉面，受源為貯存碳水化合物之塊莖。例如樹薯在葉面積指數 (leaf area index) 為 3.5 時產量最高。超過 3.5 則供源與受源不平衡。分配指數 (distribution index)，亦即塊莖生長率與總生產率之比例，急速下降 (CIAT, 1979)。因此根莖作物產量與陽光利用之模式異於穀物。

近年來臺灣推廣葡萄栽培，溫度與陽光對葡萄之產量與品質有極大之影響。葡萄中百分之九十以上之酸為蘋果酸 (malic acid) 與酒石酸 (tartaric acid)。成熟時夜溫太高則酸性較強 (Kliwer 1971)，陽光微弱亦可導致一般酸性及蘋果酸脂 (Malate) 的增加。

用水量與產量

當土壤水分充足時，葉面氣孔敞開，作物之蒸騰量主要決定於淨輻射能量之多寡與近地面水汽渦動傳送之快慢。此一蒸騰量稱為潛在蒸騰量 (Potential evapotranspiration)，當土壤水分供應不足時，氣孔半開半掩，實際蒸騰量因而低於潛在蒸騰量。潛在蒸騰量因作物生長時期而略有變異，主要農作物各時期之需水量，可參閱 Doonen Bos 與 Pruitt (1977) 之報告。

土壤水文平衡之公式為：

$$\text{雨量} + \text{灌溉水} = \text{土壤水分之變化} + \text{蒸騰量} + \text{滲透} + \text{逕流}$$

知道雨量和蒸騰量後，再測定土壤持水量 (moisture holding capacity) 及水分耗損曲線 (Moisture depletion curve)，即可用氣象方法估計灌溉所需之缺水量及剩餘水量。後者包括滲透與逕流兩項。

缺水量與作物產量之關係，相當複雜。Fischer 和 Hagan (1965) 將作物分為四

類：

(一)經濟產量佔有機物之大部分，例如牧草、蔬菜及莖梗纖維作物，用水量滿足潛在蒸騰量時，產量最高。

(二)經濟產量爲一化學性組成物，僅佔植物有機物之一小部分，例如奎寧和橡膠，用水量略低於潛在蒸騰量時，雖然生長受抑制，但有助於分化 (differentiation) 作用，產量最高。因此橡膠樹收穫前適度之缺水，雖然使生長減低百分之二十，但橡膠乳汁產量反而增加百分之四十五 (Wadleigh 1946)。

(三)經濟產量如以碳水化合物爲主之儲存器官 (Storage organ) 例如根莖作物與甘蔗。成熟期適量的土壤水分不足，可以增加糖的含量。

(四)經濟產物爲生殖器官，例如花果或種子。用水量和產量的關係最複雜，一般而言，開花期不宜缺水，但不同生育時期用水量對產量有不同之影響。

Hiler 和 Clark (1971) 首先應用作物缺水感應因子 (crop susceptible factor) 來決定任何一個生育時期缺水一天對產量的影響。後來 Hiler 等人 (1974) 將多種作物的感應因子列爲一表，用爲灌溉之指南。

Doorenbos 和 Kassam (1979) 將感應因子略加修改而稱爲產量反應因子 (yield response factor)。產量反應因子乃各生育期蒸騰量缺少的百分比和產量減少的百分比之間的關係。相對關係具有普遍性，但可在任何情形下，換算爲絕對值。該兩位著者收集了許多文獻，而決定二十三種主要作物之產量反應因子，爲國際檢驗組織所普遍採用。

作物缺乏水分時，對施肥之反應亦較差。根據 IRRI (1972) 在東南亞地區之研究得下列關係：

$$\text{潮濕季節 } Y = 2790 + 41.5N - 0.50N^2 - 50.2S_1 - 20.4S_2 + 0.76NS_1$$

$$\text{乾燥季節 } Y = 3600 + 17.9N - 0.14N^2 - 35.2S_1 - 94.4S_2 + 0.54NS_1$$

$Y = \text{稻米產量 Kg/ha}$ ， $N = \text{氮肥用量 Kg/ha}$ ， $S_1 = \text{早期缺水日 (Strss day)}$ ， $S_2 = \text{晚期缺水日}$ 。

因此在不同溫度、陽光、雨量及生育期，有效施肥量亦不相同。

災害之防護

天然災害例如凍害、颱風、暴雨、洪泛、乾旱、強風皆可能對農作物造成重大之傷害。但此種異常氣象所造成之災害不限於農業。研究論文散佈於各種雜誌。Harsr 和 Rumney (1971) 對各種植物災害防護之論文有詳盡之摘要與討論。

災害的課題甚廣，祇有防風林和氣候對病蟲害之影響非爲一般性之災害，而可以確認爲屬於農業氣象之範疇。防風林對溫度、淨輻射、降水分佈、蒸發、風速等氣象因素之影響，極爲複雜。而作物對防風林之反應亦不盡相同。WMO (1964) 有一詳盡之報告，臺灣地區防風林對稻米防護之功用，亦有研究 (楊之遠 1984)。

WMO出版了許多討論氣象與植物病蟲害關係的專著。決定各種病蟲害的氣象因素包括土壤溫度、土壤濕度、通風、露水之多寡等，某些病蟲害之分佈為局部地域性者，正陰正陽，山峯本地迥然不同。例如攜帶可可樹黑莢病 (Blach Pod epidemics) 之真菌 Phytophthona palmivora 其游動孢子在潮濕葉面繁殖後進入表皮。雨水之衝擊力太大且水層厚度不均勻。不適合游動孢子之繁殖，露水形成之薄膜最適合 (Monteith and Butler 1979)。通風良好之處少露水。因此為避免黑莢病，可可樹的種植應該避免低窪之盆地，或者時常修剪樹葉，使其不致於過分稠密而妨害空氣之流通。

結 論

第二次大戰以前，農業氣象的研究限於天氣預報和普通氣象因素的分析。大戰以後，歐美各國才開始有近地面邊界層 (boundary layer) 微氣象的研究，以及輻射、蒸發等觀察紀錄。許多開發中國家至今還沒有微氣象的研究。臺灣也是近年才開始發展。

微氣象的研究必須和作物生理反應的知識相結合，才能解答許多實際的問題。在五十和六十年代，研究的重心在光合作用和蒸騰量。七十年代以後，產量成分的組合，發育時期的長短，供源與受源的平衡，感應因子和產量反應因子等觀念才日漸成熟。這些研究工作集中在世界上十幾個農業研究中心。農業氣象學者必須不斷的利用他們研究的成果。

農業氣象研究的費用不高，而可能得到的利益極大。尤其在臺灣山坡地的合理利用必須考慮到能量和水分平衡在地域上的分佈。近年來，臺灣提倡所謂精緻農業，精緻農業的作物價值高而且需要高度的栽培技術。它們的失敗和成功常常決定於農業氣象知識的應用。

第一表 稻米實驗產量與五個重要氣象變數、開花前三個變數：日溫 (TDB) °C，日夜溫差 (DNB) °C 及
 累積輻射 (RSB) 100mWh / cm²；開花後兩個變數：夜溫 (TNC) °C 及累積輻射 (RSC)
 1000mWh / cm²

實驗地點	國家	緯度	高度 (米)	DNB	TDB	RSB	TNC	RSC	產量 (噸/公頃)
Paranthan 1	錫蘭	8°59'N	4	1.4	26.1	16.852	24.5	9.998	2.40
Goydebpur 1	孟加拉	23°54'N	8	2.1	29.8	26.791	26.2	7.997	2.49
Cuttack 1	印度	20°30'N	23	2.1	29.7	24.516	25.8	12.497	2.74
Paranthan 2	錫蘭	8°59'N	4	2.3	30.5	36.070	26.8	15.074	3.01
屏東 4	中國	22°40'N	24	3.3	28.9	17.626	23.4	10.170	3.21
Masapang 2	菲律賓	14°10'N	21	2.4	28.2	28.852	25.6	11.031	3.40
Parwanipur 1	尼泊爾	27°04'N	115	2.5	30.1	30.947	21.9	14.276	3.49
Muara 1	印尼	6°36'N	240	2.9	27.0	24.060	24.8	12.760	3.51
Cuttack 3	印度	20°30'N	23	2.8	31.1	28.587	27.3	12.060	3.82
Sukamandi 2	印尼	6°15'N	7	3.0	28.5	26.824	25.2	15.595	3.88
Pattambi 1	印度	10°48'N	25	2.8	28.2	26.463	24.8	16.239	3.92
Cuttack 4	印度	20°30'N	23	2.6	29.7	28.726	22.3	12.197	4.18
Sanpatong 1	泰國	18°45'N	312	2.9	29.4	27.801	25.7	12.014	4.28
南京 3	中國	32°03'N	9	2.8	28.9	28.674	20.1	10.203	4.30
Muara 2	印尼	6°36'N	240	3.2	27.8	24.831	24.2	12.892	4.33
屏東 1	中國	22°40'N	24	3.2	29.9	29.399	27.0	10.968	4.35
Sukamandi 1	印尼	6°36'N	7	2.2	27.4	26.413	25.9	15.257	4.36
Los Banos 3	菲律賓	14°10'N	21	2.6	28.8	25.803	25.7	11.511	4.37
Kapurthala 2	印度	30°56'N	247	3.0	30.2	27.989	22.7	13.611	4.43
屏東 3	中國	22°40'N	24	3.9	23.4	33.071	23.5	10.874	4.45
Pattambi 2	印度	10°48'N	25	2.1	26.9	24.313	25.3	17.397	4.46
Kapurthala 1	印度	30°36'N	247	3.0	31.1	32.055	26.3	14.107	4.63
Cuttack 2	印度	20°30'N	23	4.6	29.5	38.355	29.4	14.970	4.69
Coimbatore 1	印度	11°02'N	431	4.0	28.3	38.660	23.0	14.072	5.15
南京 1	中國	32°03'N	9	3.1	28.3	32.774	19.1	11.926	5.23
Hyderabad 2	印度	17°25'N	545	3.2	28.3	31.170	24.7	16.611	5.34
Coimbatore 2	印度	11°02'N	431	3.0	27.1	36.402	24.1	16.306	5.57
Masapang 1	菲律賓	14°10'N	21	2.4	26.3	32.304	25.8	19.237	5.67
南京	中國	32°03'N	9	2.9	28.1	34.403	23.5	12.285	5.84
Suweon 4	南韓	37°16'N	37	3.2	25.7	29.632	20.7	15.135	5.87
Sanpatong 3	泰國	18°45'N	312	6.0	29.6	35.379	25.4	13.838	5.92
Los Banos 2	菲律賓	14°10'N	21	3.0	29.0	30.980	26.6	14.979	6.22
Suweon 2	南韓	37°16'N	37	3.3	25.3	31.159	21.5	14.283	6.41
Palmira 2	哥倫比亞	3°31'N	1,006	3.5	25.2	30.347	21.2	16.093	6.44
Milyang 4	南韓	35°29'N	12	3.5	27.2	20.151	20.8	17.240	6.48
Milyang 3	南韓	35°29'N	12	3.6	27.1	32.336	20.0	15.162	6.86
Milyang 3	南韓	35°29'N	12	3.7	27.1	34.838	21.0	16.110	7.54
Milyang 3	南韓	35°29'N	12	3.9	25.8	35.542	23.4	18.039	7.55
SaKha 1	埃及	31°05'N	20	4.6	26.2	56.301	20.7	19.580	8.72

第二表 屏東兩期稻米實驗結果

	移 植 至 開 花			開 花 至 收 穫			每叢 圓錐 花序	產量 噸 / 公頃
	夜溫 °C	輻 射 mWh/cm ² /日	時期 日	夜溫 °C	輻 射 mWh/cm ² /日	時期 日		
第一期	15.8	390	89	21.4	371	26	20	4.4
第二期	22.7	317	71	14.7	275	36	12	1.7

參考文獻

1. 郭文鑠、楊之遠，1980，台灣農業氣象區域規劃，中央氣象局。
2. 張鏡湖，1986，台灣地區全年太陽輻射之分佈，台灣大學地理系，24頁。
3. 張鏡湖，1988，嘉義農業氣象觀察站漫射紀錄之分析，台灣大學地理系，9頁。
4. 張鏡湖、鄭師中、劉明揚，1986，“台灣地理太陽輻射量資料分析之研究”，中國太陽能學會論文集，15—47頁。
5. 楊之遠，1984，風對水稻生長及生理特性的影響，台灣大學博士論文。
6. 楊之遠，1986，“遮蔭處理對玉米微氣象及玉米產量之影響”，行政院農業委員會補助計畫編號：75農建—10.1—林—46，27頁。
7. Centro Internacional de Agricultura Tropical, 1978. Annual Report, Cali, Columbia.
8. Centro Internacional de Agricultura Tropical, 1979. Annual Report, Cali, Columbia.
9. Chang, Jen-hu, 1981. Corn yield in relation to photoperiod, night temperature, and solar radiation. Agriculture meteorology, Vol. 24, pp. 476—477.
10. Cock, J. H., D. Franklin, G. Sandoval, and P. Juri. 1979. “The ideal cassava plant for maximum yield.” Grop Science, Vol. 19, pp. 271—279.
11. de Wit, C. T. 1965. “Photosynthesis of leaf canopies.” Agriculture Research Report, No. 663, pp. 1—57.
12. Doorenbos, J., and A. H. Kassam. 1979. Yield Response to Water. Irrigation and Drainage Paper, No. 33, Rome, FAO.
13. Doorenbos, J. and W. O. Pruitt. 1977. Crop Water Requirements. Irrigation and Drainage Paper, No. 24, Rome, FAO.
14. Duncan, W. G. 1975. “Maize.” In: L. T. evans (editor), Crop Physiology. Cambridge University

Press, pp. 23–50.

15. Fischer, R. A. and R. M. Hagan. 1965. "Plant water relations, irrigation management and crop yield." *Experimental Agriculture*, Vol. 1, pp. 161–177.
16. Hiler, E. A., and R. N. Clark. 1971. "Stress day index to characterize effects of water stress on crop yield." *American Society of Agricultural Engineers, Transactions*, Vol. 14, pp. 757–764.
17. Hiler, E. A., T. A. Howell, R. B. Lewis, and R. P. Boos. 1974. "Irrigation timing by the stress day index method." *American Society of Agricultural Engineers, Transactions*, Vol. 17, pp. 393–398.
18. International Rice Research Institute. 1972. Annual Report, Los Banos, the Philippines.
19. Kliever, W. M. 1971. "Effect of day temperature and light intensity on concentration of malic and tartaric acids in *Vitis vinifera* L. grapes." *Journal of American Horticulture Science*, Vol. 96, pp. 372–377.
20. Monteith, J. L. 1965. "Light distribution and photosynthesis in field crops." *Annals of Botany, New Series*, Vol. 9, pp. 17–37.
21. Monteith, J. L. and D. R. Butler. 1979. "Dew and thermal lag: a model for cocoa pods." *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, Vol. 105, pp. 207–215.
22. Murata, S. 1975. "Estimation and simulation of rice yield from climatic factors." *Agricultural Meteorology*, Vol. 15, pp. 117–131.
23. Neild, R. E. and E. Boshell. 1976. "An agronomic procedure and survey of pineapple production potential of Columbia." *Agricultural Meteorology*, Vol. 17, pp. 81–92.
24. Nuttonson, M. Y. 1947. Ecological crop geography of the Ukraine and agroclimatic analogues in North America. Institute of Crop Ecology, No. 1, pp. 1–24.
25. Oldeman, L. R., D. V. Seshu, and F. B. Cady. 1987. "Response of rice to weather variables." In: *Weather and Rice*, International Rice Research Institute, pp. 5–39.
26. Penman, H. L. 1948. "Natural evaporation from open water, bare soil, and grass." *Royal Society, Proceedings, Series A.*, Vol. 193, pp. 120–145.
27. Peters, D. B., J. W. Pendleton, R. H. Hageman, and C. M. Brown. 1971. "Effect of night temperature on grain yield of corn, wheat and soybeans." *Agronomy Journal*, Vol. 63, pp. 809.
28. Wadleigh, C. H., H. G. Gaugh, and O. C. Magistad. 1946. Growth and rubber accumulation in guayule as conditioned by soil salinity and irrigation regime. Technical Bulletin 925, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.
29. World Meteorological Organization, Working Group of Commission for Agricultural Meteorology. 1964. Windbreaks and Shelterbelts. Technical Notes, No. 59.
30. Yoshida, S. 1977. "Rice." In: P. de T. Alvim and T. T. Kozłowski (editors), *Ecophysiology of Tropical Crops*. Academic Press, pp. 57–87.