農業氣象災害調查與防護技術
氣象因素與植物病害流行關係之監測與分析
11-34, 2003

氣象因素與植物病害流行關係之監測與分析

黃益田
行政院農委會桃園區農業改良場
E-mail: ythuang@mail.coa.gov.tw

摘要 ---------- 12

一、前言 ---------- 12

二、植物病害之監測 ---------- 13

三、氣象因素之監測 ---------- 19

四、監測資料之分析及應用 ---------- 24

五、結語 ---------- 26

六、引用文獻 ---------- 27

ABSTRACT ---------- 33

氣象因素與植物病害流行關係之監測與分析

黃益田
行政院農委會桃園區農業改良場
E-mail: ythuang@mail.coa.gov.tw

摘要

本文主要探討有關氣象因素與植物病害流行之監測技術與其資料之分析。植物病害之監測方面，闡述病害定量與定性之屬性、評估之適期與頻率、病害評估之步驟、病害圖解與尺度、及遙感探測等問題。氣象因素之監測方面，綜述氣象變數之觀測，包括溫度、水分(相對濕度、葉面濕潤、雨、土壤水分)、風及輻射等。資料分析方面，介紹病勢進展曲線要素、始發病量(Yo)、傳染速率(r)、發病曲線下面積(AUDPC)及最高發病率(Ymax)之分析，以及經驗與迴歸模式之建構。

關鍵詞： 氣象因素、植物病害流行、病害監測與分析。

一、前言

氣象常爲植物病害之誘因。植物病害潛伏之長短、發生之遲速及蔓延之廣狹，直接或間接地受自然氣象諸如風、雨、光、溫的影響。病原體之繁殖及侵入有其最適宜之溫度及濕度等氣象條件，所以根據發病前期的氣象狀況，可以預測病害之發生情況。而，生產者可據以進行適期防治，減少農藥成本之支出，提升農藥使用之安全性。因此，作物病害氣象預報，自然成爲病害體系不可或缺的組成部分(黃，1997)。植物病害流行學的目的首先就是預測，有了準確而全面的預測才能進行合理的病害綜合治理(曾及楊，1984)。

影響病害發生及流行之氣象因素，包括風速、溫度、濕度、降水量、結露及日照時間等。有許多病害之發生預測，係應用這些因素與病害之關係來發展預測模式。例如，水稻葉稻熱病發生類別(黃，1983)、初發期(Huang，1988)、感染日(橋本，1978)、感染好適葉面濕潤時間(越水，1982)預測等；胡蘿蔔葉斑病感染預測(Gillespie and Sutton, 1979)，馬鈴薯晚疫病感染預測(Krause *et al.*, 1975)等，乃屬於經驗法則之應用；葉稻熱病病斑數(蔡，1984)、病葉率、病莖率、發生面積(後滕，1962)、盛行率(黃，1983)；白葉枯病盛行率(黃，1994)等預測，則屬於統計模式預測；另有葉稻熱病BLAST(橋本，1978)、蘋果黑星病 EPIVEM，屬於系統分析(模擬)模式之預測。無論發展上述任何一種預測模式，均須先行調查蒐集農業氣象因素及植物病害病勢進展之資料，纔能建立預測法則、統計模式或系統分析模式。

臺灣自 1966 年以來，即有研究團隊從事氣象因素及水稻病害病勢進展之監測，並發展出許多預測模式，以氣象變數去預測病害之發生及進展，提供預報服務。然而，近二十年來，由於農業環境變遷急劇，此類研究日漸式微，

不僅無法再次提升預報服務之功能，更無以擴及他種作物，如蔬菜、果樹病害之預報服務。而，消費者對農藥安全使用之要求，卻日益增高。況且，一般防治多採用防治曆的作法，按照防治曆施藥，難免有時浪費，有時不夠及時。如果能進行病害發生或感染預測，就易做到及時、經濟而有效的防治，且減少環境污染。從整體植物健康管理系統著眼，預報服務爲值得操控的部分系統，因此，本文特援引有關農業氣象因素及植物病害監測及預測有關之文獻，撮要綜介於次，以供識者之參考。

二、植物病害之監測

植物病害評估(disease assessment)在植物流行病學中是最重要而最艱難的工作。在一定時期內評估發病量(amount of disease)之資料，爲統計分析、模式建構及病理系統詮釋之基石。在病害評估時所引進的誤差，有時可能無法察知，然而，在其後之流行病學分析，則有可能被放大的風險。此外，結論之確定程度(degree of certainty)及眞實效應(true effects)區別之能力，可能不會比放在病害評估值(disease assessment values)之可信水準(level of confidence)來得更佳或更可靠。

病害評估，通常非常耗時；因此相當昂貴。審愼規劃「如何」、「何時」、「何處」、「由誰」評估非常重要。規劃特殊的調查，需要明晰的概念及對病害系統(pathosystem)詳盡的知識。成功的評估方法，提供準確、精密、可重複的結果。其方法可以記述，以供後來之調查者能夠評估資料之蒐集及重複其有用之方法。評估體制(assessment scheme)必須適合工作需要並且效率高，及滿足研究及評鑑(evaluation)所列舉之目的(Campbell *et al.*, 1990)。

(一)被評估之病害屬性(Attributes)

病害評估，分爲定量的(quantitative)、定性的(qualitative)或兩者兼具。病害數量(quantity)歸納爲病害強度(disease intensity)(Seem,1984; Moore, 1943; Kranz, 1988)，而，病害強度可區分爲病害發生率(disease incidence, DI)及病害面積率(Disease severity, DS)兩種評估方法。此外，可反應病害強度者，例如組織內孢子發芽之病斑數、繁殖體或菌落形成單位之濃度(concentration)或測定量(titer)等特性狀。定性(gualitative)測定法，包括如市場品級(market grade)：寄主或寄主產品之蛋白質、油、或營養成分；其他消化率(digestibility)，風味(taste)及氣味(smell)等因素。

病害發生率，稱發生率或發病株率，係指發病明顯的植物體單位數(plant units)(James, 1974)，一般以其與評估單位數總計的比例來表示；或稱爲罹病株率(percentage of infected plants)。發生率可採用植物之枝、葉或根爲植體單位。

病害面積率，稱發病率、罹病度或嚴重度，係指植體發病面積(area)或容積(volume)與調查總面積或容積之比例來表示(Kranz, 1988)。

病害盛行率(disease prevalence)，係指發病田之面積與調查總面積之比例。例如某鄉鎭水稻稻熱病發病面積爲 20,000 公頃，栽培面積爲 100,000 公頃，其盛行率即爲 20%(黃，1983)。

發生率(DI)與發病率(DS)都非常有用，對個別病害系統(specific pathosystem)都要建立適當的測量方法。發生率(DI)之測量，爲最簡便的病害評估方法。例如番茄萎凋株數，小麥黑穗病穗數，長瘤根數，或病斑葉數，或呈嵌紋病葉數等都可以精確地計數。發生率對許多一個病斑／植物單位即可致命，或萎凋性及系

統性病毒病害不失爲適當的病害測量法。對果樹、綠蔭及林木類而言，呈現病徵的葉及針葉的發生率測量相當適合。發病率(DS)之估計或觀測，則更困難費時。而且，準確性、精密性及可重複性(reproducibility)比發生率低。然而，就各種病害系統而言，關於病害管理、族群動態及作物損失估計而言，發病率(DS)之測量更爲重要而有用。

在許多病例中，發病率爲評估植株單位之分數量來表示。許多植物生理及作物損失估計證據顯示，收量可由發病總面積決定。然而，以不發病(disease free area)總面積爲作物收量之決定因素更爲精確(Waggoner and Berger, 1987)。

(二)評估之適期及頻率

病害評估之適期(timing)及頻率(frequency)，由病害系統及評估目標而定。評估時間，可能受整體流行病或特殊重要階段，或執行評估的方便性所影響。

病害評估，基於曆法尺度(calendar scale)，或生理—環境尺度(physiological-environmental scale)。在流行病評估研究上，最常用的曆法尺度以爲 5-、7-、10-、或 30-日間隔爲時程。曆法評估(calendar assessment)非常方便，易於按預定日期計畫；可提供規則性的空間資料，以時間爲獨立變數，指出病勢進展(disease progress)之分析方向。

生理—環境時間尺度法，採用一種環境數量(environment quantity)或對寄主及病原體(pathogen)生理狀態特別重要之組合。此類尺度基於環境單位(environmental units)必須按順序累計到一個生理程序(physiological process)發生的一種理念。超過某一特定基礎溫度(basic temperature)之日度(degree-days)數，即爲顯著之例。此一尺度須持續監測環境變數。安排定期評估這類變數較曆法評估更困難。

生理—環境尺度之推廣，基於寄主植物生育期之應用，以寄主作爲基礎尺度，植株本身即爲環境效應之統合物(integrator)。假設生育期是基於在寄主生活史裡一連串關鍵事件(key events)，則在關鍵期之病害評估，有助於提供作物損失估計，抗病育種材料之評估資訊，以助分析及構築模式之目的。

病害評估之頻率，可能由發生事件、病害流行各時點之資訊需求，或經濟上的考慮所左右。以生理—環境或生育期尺度而言，特定事件的發生，換言之，X 日度(degree-days)或過度(transition)至下個生育期之情況，亦影響病害之評估頻率。如果須要詳盡的統計或數學分析，評估次數之多寡，可能視實際需要特定之觀察次數或病害流行期間之臨界時段(critical portions)觀察之需而定。在病害流行 90 天，每週評估一次，則有 12-13 個均勻的觀察空間(圖 1A)，此評估次數已足以滿足大部分的目的；然而，如果經濟上的考慮指定少於 12 次觀察，則不規則間隔(interval)之評估，可能更爲有利。採用不規則間隔評估(圖 1B)，在流行病變換期(transition stage)可作較多次的觀察，使病勢進展曲線重要部分獲得改善。

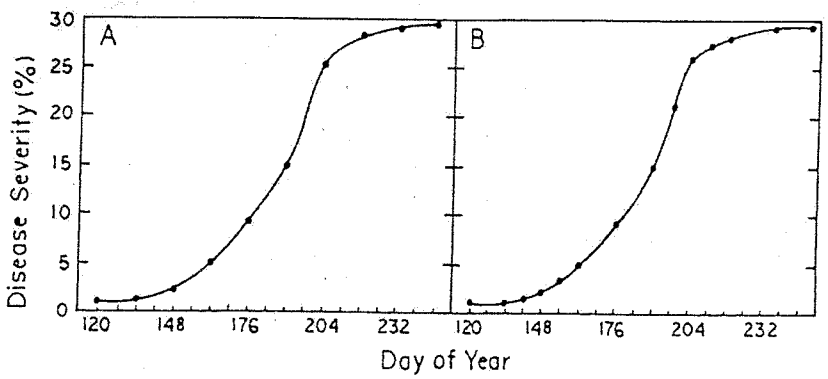


圖 1. A.每週定期抽樣 10 次罹病度觀察；B.不定期抽樣流行病過度期集中評估 14 次。

Fig. 1. A, Regular weekly sample interval with 10 observations of disease severity; B, irregulars sample intervals and concentration of 14 assessments at "transition" phases of the epidemic. (Campbell *et al.*, 1990)

病害評估時，經濟之考量與特定資訊之獲取，必須取得平衡，如果時間爲其限制因素時，必須明確訂定最低評估次數。評估目的及試驗單位內部之不同見解，可以辨別一個地點(site)或試區，較多觀察次數，是否優於許多地點較少之觀察次數。在決定評估適期及次數前，對滿足實際目的所需之定量與定性資料之蒐集，更應有週詳的考慮(Campbell *et al.*, 1990)。

(三)病害評估步驟

1.優良評估體制之屬性

優良的病害評估系統，具有準確性，精密性及可重複性(reproducibility)等屬性。最佳的評估系統，以圖解(diagrams)及評估檢索表(assessment keys)爲基礎，可使評估者看清連續病害尺度(continuous disease scale)。

2.資訊之紀錄

紀錄資料，包括生育期、日期、或生理－環境時間及評估之器官(organ)等。記錄抽樣方法，可隨意的(arbitrarily)、隨機的(randomly)或系統的(systematically)。

病害評估者(disease evaluator)之功能，也不能忽視，評估者須事先練習評估方法以保證評估的整齊度(uniformity)及評估者間之可靠度(inter-rater reliability)。每一單元的評估者，必須作記錄，以便與其他評估者作誤差之比較。

(四)病害圖解及尺度

病害評估，首先必須對病徵性狀透徹的瞭解。病害分級尺度(Disease rating scales)及標準圖解(Standard diagrams)可能改進評估之效率、可重複性及精密性。分級可以增進不同評估者，評估前後之一貫性(consistency)。

最早之病害評估分級尺度，在 1892 年，由澳洲 Cobb 氏所提出，其穀類葉銹病評估尺度，分爲 5 級，分別爲 1，5，10，25 及 50%。其後，Cobb 尺度之概念推廣應用於許多植物病害。1971 年 Dixon、Dodeon 及 James 都發表過測量許多作物病害之圖解及檢索表(keys)。表 1 爲部分植物病害評估之標準圖解一覽表。圖 2 爲葉稻熱病罹病程度調查基準圖，可作爲評估檢索。

表 1. 應用於植物病害評估之標準圖解(插圖畫檢索表)精選(Campbell *et al.*, 1990)
Table 1. Selected standard diagrams (pictorial keys) for use in assessment of plant disease. (Campbell *et al.*, 1990).

Host	Disease	Pathogen	Reference
Apple	Blotch	*Phyllosticta solataria*	Tehon and Stout (1930)
	Frogeye leaf spot (black rot)	*Botryosphaeria obtusa*	Tehon and Stout (1930), Chester. (1950)
	Scab	*Venturia inaequalis*	Tehon and Stout (1930), Croxall *et al.* (1952), Kranz (1970)
Bean	Blight	*Xanthomonas phaseoli*	James (1971)
Carrot	Leaf blight	*Alternaria dauci*	Strandberg (1988)
Cherry	Leaf spot	*Coccomyces hiemalis*	Tehon and Stout (1930)
Corn (maize)	Southern corn leaf blight	*Bipolaris maydis*	Fry et al. (1984)
	Northern corn leaf blight	*Helminthosporium turcicum*	Chester (1950), Ullstrup *et al.* (1945), Fullerton (1982)
Cucumber	Anthracnose	*Colletotrichum lagenarium*	Thompson and Jenkins (1985)
Peanut	Leaf spots	*Cercospora, Cercosporidium*	Shokes *et al.* (1987)
Pear	Fire blight	*Erwinia amylovora*	Tehon and Stout (1930)
Pineapple	Interfruitlet corking, leathery pocket, fruitlet core rot	*Penicillium funnicosum and Fusarium moniliforme*	Rohrbach and Taniguchi (1984)
Potato	Late blight	*Phytophthora infestans*	James (1971)
	Scab	*Streptomyces scabies*	James (1971)
Sunflower	Leaf spot	*Alternaria helianthi*	Allen *et al.* (1983)
Sweet potato	Streptomyces rot	*Streptomyces ipomoea*	Moyer *et al.* (1984)
Wheat	Powdery mildew	*Erysiphe graminis*	James (1971)
	Leaf spot	*Helminthosporium* spp.	James (1971)
	Glume blotch	*Septoria nodorum*	James (1971)
	Speckled leaf blotch	*Septoria tritici*	Eyal and Brown (1976), Jones and Cooke (1969)
	Rust	*Puccinia graminis*	James (1971) Peterson *et al.* (1948), Zadoks and Schein (1979)
	Black chaff	*Xanthomonas translucens*	James (1971)

晚近，利用視像影像技術(video image technology)開發出定格的病害評估圖解，以測量寄主生長(Lindow and Webb, 1983)。發生病斑之葉及根可以藉助數位相機觀察及微電腦之數位化功能展示及詮釋發病及健康部分。利用不同病害強度之葉片及根，可以發展出標準面積圖解。同理，也可製作出葉片面積圖解，作爲病害評估的輔助工具。如果有足夠時間採破壞性抽樣(destructive sampling)，眞正的罹病度(actual disease severity)可以用影像分析來測量。

雖然，在許多情況下，可方便使用圖解，但研製這種圖解非常費時；如果以調查整個小區植株替代個別葉片及植株效果有限。因此，就非常需要病害尺度(disease scale)。病害尺度，係將可能的發病率全距，分爲若干級別(class)，包括數個類別(categories)及摹狀詞(descriptions)，但無圖解。圖解及分級檢索爲

發病率水準之例證，反應病害尺度間隔或級別。1945 年，Horsfall and Barratt 引用 Web-Fechner 定律作爲病害評估之基礎。

Weber-Fechner 定律敘述視覺敏銳(visual acuity)與刺激之對數(logarithm)成正比，刺激增加識別力降低。1945 年 Horsfall and Barratt 氏提出非直線的，幾乎是對數的病害級別尺度。假設，對病害正確目視範圍低於 50%的部分，而對健康組織之正確目視範圍，則超過 50%部分(Horsfall and Cowling, 1978)。因此，病害級別(disease class)在 50%爲對稱的(表 2)。當級值(class values)記錄，用來評估變數之發病率及病害百分率時，級值之平均值則不適用，易產生偏差的結果，使病害評估尺度失效。在分析之前，必須轉換(convert)級值爲百分率。在轉換時，可採取間隔之中點(midpoint)，在 Elanco 表之數值則稍有差異。例如三個植株評估爲 1，4，及 7，則可以採用 1，5，18.5，81.5 之平均發病率。雖然，後來有學者刻意安排將中間尺度內距範圍縮小之研究，但證明如此安排並無法清楚區別。一般認爲 Horsfall-Barratt 尺度極具價值。



圖 2. 水稻葉稻熱病罹病程度調查基準。
Fig. 2. Disease diagrams for assessment of severity of rice leaf blast.

表 2. 供罹病等級、罹病度互換及資料分析用之 Horsfall-Barratt 評估尺度。
Table 2. The Horsfall-Barratt Scale for assessing disease and Formula Percent Values for Converting Class Values to Percentage Values for Averaging and Data Analysis.

Class	Disease (% Severity or incidence)	Value to use to convert back to percentage	
		Midpoint	Elanco formula [a] (%)
0	0	0	0
1	0-3	1.5	2.34
2	3-6	4.5	4.68
3	6-12	9.0	9.37
4	12-25	18.5	18.75
5	25-50	37.5	37.50
6	50-75	62.5	62.50
7	75-88	81.5	81.25
8	88-94	91.0	90.63
9	94-97	96.5	95.31
10	97-100	98.5	97.66
11	100	100	100

[a] See Redman *et al.* (1969).

(五)遙感探測

遙感探測在植物病害評估之應用，基於作物冠層可吸收及反射偶然輻射(reflect incident radiation)之原理；而健康或非逆境植物(nonstressed plants)與發病植物或逆境植物比較，有不同的吸光率(absorbance)及反射特性(reflectance characteristics)，而這種差異可以定量觀測(Jackson, 1986)。典型的綠葉可視及紅外線電磁光譜(infrared electromagnetic spectrum)如圖 3。

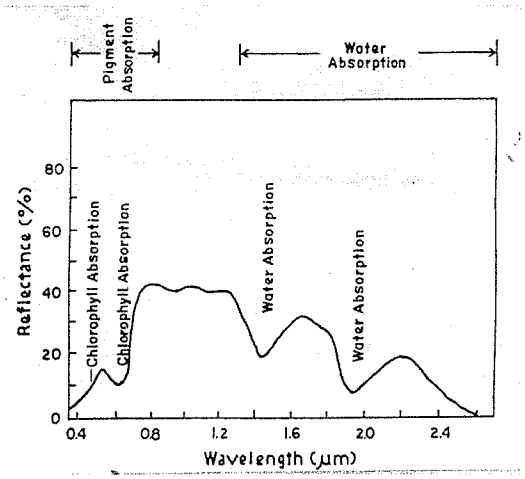


圖 3. 一片綠葉之反射光譜。
Fig. 3. Generalized spectral reflectance of a green leaf. (Campbell *et al.*, 1990)

遙感探測係從三種高度探測或估計植物病害。地面遙感探測，係最低高度在離開作物 1.5–2.0 公尺，採用多光譜輻射計(multispectral radiometers)來記錄目標區作物之多光譜信號(multispectral signatures)。其次，低空遙感探測，係在 75–1,500 公尺高度，以飛機或直昇機進行空中攝影。高空遙感探測，係從 650–850 公里高度之衛星規道(satellite orbiting)進行主題地圖繪製(thematic mapping)或圖像(imagery)。

遙感探測在植物病害強度評估上，是一種極爲有用的技術。然而，其適用性也受其特性所制約。其反射資料(reflectance data)或光譜信號(spectral signature)，不一定保證是由某一種特定病害所引起。在評估農業或森林生態系整體健康(overall health)時，有相當的優勢，例如作爲生產潛力(yield potential)之指標，比任何一個單獨生物學或環境變數更佳。多光譜放射計(multispectral radiometers)最適宜於田區間或小試區間的觀測，而空中紅外線攝影(aerial infrared photography)，則適用於大田區之觀測，而衛星空照(satellite imagery)，則適於大範圍地區(regions)的監測。

(六)抽樣技術

抽樣技術在植物病害流行之研究上，極爲重要。在計數病害屬性之數量時，欲遍及全田，每爲時間與人力所不許，故須應用抽樣方法，由全體抽出一部分，以作估計之用，其目的爲由樣本估得之準確、精密的估計值，在試驗機誤範圍內，可以代表全體。欲達到此目的，則須決定(1)全體應取若干樣本；(2)樣本應如何取得；(3)用何種抽樣方法，方可估得抽樣機誤，以定其代表程度。欲解決此等問題，則不得不研討抽樣之技術。

1.抽樣單位(Sampling unit)

抽樣單位之選擇，對抽樣計畫有決定性之作用，例如小麥銹病之於產量損失與劍葉之病害面積率相關，則劍葉可選爲抽樣單位。同理，如果欲估計微菌核形成菌(microsclerotia-forming fungus)之繁殖體(propagules)，在土壤中之族群，採用 2.5-cm 直徑採土器(soil probe)，從 64 個 4 × 4 m 方塊取樣，每一個樣本條即爲樣本單位(Seem, 1988)。

2.抽樣頻率(Sampling frequency)

抽樣頻率及一定期間內抽樣的數目，由研究目的及可利用資源之多少而定。例如研究病

勢進展時，病害強度樣本之抽樣越多就比抽樣少者更能解答進展型態。抽越多樣本，病勢進展速率之估計，則越可靠。

3.樣本設計(Sample design)

一般而言，樣本有三個基本型：簡單的逢機樣本(Single random samples)，系統樣本(Systematic samples)及分層樣本(Stratified samples)。病害空間分佈模型(Spatial pattern)分爲隨機(random)或聚集(aggregated)模型(pattern)。病害分佈爲隨機模型的，可採用隨機抽樣，或模型抽樣(pattern sampling)，增加樣本(n)數比增加抽樣臂(sampling arms)更爲有效。所謂抽樣臂，指系統模型樣本之一個段(segment)，例如W型，X型或鑽石型之一段(圖4)。反之，如病害分佈爲聚集或群聚(clustered)型，則增加抽樣臂爲佳，換言之，W型系統抽樣或對角線抽樣比隨機樣本爲佳。

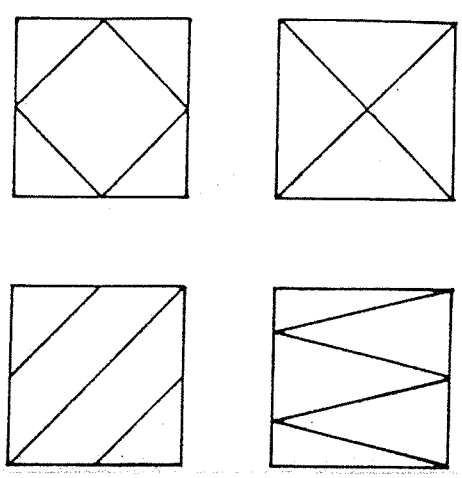


圖 4. 四種抽樣模型，樣本以 X、W、鑽石、或三對角線路徑區分抽樣。

Fig. 4. Four sampling patterns. Samples would be selected at preset, regular intervals along the path demarcated for the X, W, diamond, or triple diagonal pattern (Campbell *et al.*, 1990).

三、氣象因素之監測

自然環境對病害之流行趨勢的影響，係通過與寄主植物各特定發育階段之互動，而導致對病原體生活史之階段產生效用。其間，氣候(climate)與天氣(weather)對流行病發生極具關鍵之影響。因此，氣候與天氣之監測，就病害預測及防治而言，非常重要。氣候，乃各地或全球氣象現象，在長期間內演變之平均狀況(胡，1966)。1980年Mitchell報告指出，氣候定義爲產生天氣之動態物理系統。氣候分大氣候(macroclimate)、中氣候(mesoclimate)及微氣候(microclimate)，大氣候指發生於 50–1,000 km 高度範圍內之氣候現象或指全球各地之特徵；中氣候指發生於 100 m–100 km 高度範圍內之氣候現象，係一特殊地理景觀或山岳模型(orographical pattern)之特徵；微氣候指 1 mm–300 m 高度範圍之氣候現象，通常指接近植株冠層的氣候現象(Friesland and Schröter, 1987)。大氣候不僅決定作物之地理分佈，而且影響特定植物在某些地理區之發生。例如香蕉生長於中南美而不長於北美；*Sclerotium rolfsii* 引起南方菌核病，嚴重危害美國南方各州之蔬菜及雜糧作物，却不發生於北美各州。在德國，Weltzin 氏曾報告氣候在病害分佈之重要性(Weltzien, 1978, 1988)。在美國，Coakley 氏等報告氣候變化與冬小麥條銹病(Stripe rust)顯著高相關性(Coakley, 1985)。

一般氣象因素與流行病之關係研究，大都把焦點集中在微氣候或近地層氣候上。植物流行病學家對微氣候資訊之蒐集，主要在天氣變數(weather variables)，如溫度(temperature)、濕度(humidity)及風(wind)。用於監測之微氣候及天氣變數之儀器，包括電子(electronic)及非電子(non-electronic)儀器。而電子微處理機資料收集系統，在植物病害流行學研究上，也已廣泛地被採用。

(一)一般考慮及注意事項

在植物族群之環境中，無論是葉圈(phyllosphere)或根圈(Rhizosphere)，其變異(variation)爲三維空間。田間之變異大於溫室或人工氣候室(phytotron)。然而，在精密人爲環控之生長箱內，也呈現某一程度的變異。(Lee and Rowlings, 1982)觀測作物環境之困難度，因作物之冠層及根圈之影響而加深。此外，植物環境變化受到每一季或生長季節間植物本身生長所制約。而曆日與季節變換，同具影響力。Coakley(1985)認爲天氣變數之監測，須優先考慮其需要與否。環境監測之重點，可能爲個別葉、根部或植株，以至植物族群，或在一個葉圈或根圈觀測。不同目的之觀測，其測量設計(measuring devices)或感應器不同。最後資訊之用途可歸納爲四種：(1)決定特定環境量與病原體－病害屬性之關係，例如露水週期(dew period)與胞子形成(sporulation)之關係；(2)比較不同地區與季節之病害流行之環境條件；(3)評估管理技巧；(4)發展植物病害預測系統及模擬模式。

(二)氣象因素及其觀測

植物流行病學研究最常觀測之氣象因素包括溫度、水分、輻射及風。每一種因素不僅個別地、深層的影響，並且交互影響初發及病害的進展。因爲病害系統是混合生物－環境交感的結果，在反應某些環境因素之效應時，在生物成分上，會發生某種程度的補償作用(Rotem, 1978)。爲了簡化及單純化，一般都將氣象因素分開單獨討論，然而實際上，在對流行病之作用上，很少有單獨的作用發生。

1.溫度觀測

用於流行病學研究之溫度計，可分爲三類：(1)玻管液體溫度計(liquid-in-glass)；(2)變形溫度計(deformation)；(3)電測溫度計(electrical)。

玻管液體溫度計，即一般酒精或水銀溫度計。精密度約 0.5℃，雖可讀性差，但方便又便宜，應用較廣。變形溫度計，包括雙金條(bimetallic strip)及巴塘(Bourdon tube)或filled-system 溫度計，準確性在± 1℃，適用於平均溫之觀測。這類型溫度計適合在環控生長箱使用。電測溫度計適用於自動記錄器選擇性的感應器(sensor)，可遠距觀測，電測溫度計分爲熱偶溫度計(thermocouple)及熱阻體溫度計(thermister)兩型。兩者都廣泛用於具微處理機之資料蒐集機(data logger)(Campbell *et al.*, 1990)適當氣溫觀測須離地面 1 至 1¼公尺，空氣流通，避免直接日射及牆或地面之反射(羅，1972)。在水稻病害流行學研究上，採用自計溫濕度計，能連續一星期紀錄溫度。

2.水分觀測

相對濕度(relative humidity)，葉面濕潤(leaf wetness)雨(rain)及土壤水分(soil moisture)爲流行病學研究最常觀測之水份變數。

用以觀測相對濕度之濕度計(hygrometer)包含四種基本型式：(1)觀測空氣溫度；(2)吸水物質物理空間之變化；(3)表面水膜之凝結；(4)物質吸收水分之電性變化。每種濕度計都有不同的操作原理，使用時務必瞭解其潛在限制及問題。乾濕球溫度表(Psychrometer)包括乾球及濕球兩種溫度計。乾濕兩種溫度測量應在鄰近或同一植物冠層(canopy)及同一高度進行(Friesland and Schrödter, 1987)。乾濕表使用時要經常維護，芯要保持乾淨，貯存充足水分。如果使用熱阻體(thermisters)乾濕計，要定期校正標準。如果使用 Assman 溫濕球溫度計，應通風及遮護，避免輻射。(Rosenberg *et al.*, 1983; Davis *et al.*, 1983)。相對濕度理想校正下，乾淨的乾濕球溫度表，配以準確的(± 1℃)的熱阻體，觀測誤差在 2%。第二型毛髮濕度計(hair hygrometer)，觀測 RH 應用最廣(Pennypacker, 1978; Rosenberg *et al.*, 1983)。使

用這型毛髮濕度計，須與通風濕度表(aspirated hygrometer)校對主要範圍之讀數。因爲毛髮在經過一段時間後會退滯，影響刻度之查看，濕而髒的毛髮，讀數不可靠。毛髮濕度計反應時間爲 5 分鐘，RH 迅速變動之環境條件下不適用。

表面水膜或露之凝結，可以直接測量大氣中的濕度。在露點濕度表(dew-point hygrometer)，露點溫度可藉測量一個經熱電冷却至發生凝結(露)程度的鏡面之表面溫度(Pennypacker, 1978; Rosenberg *et al.*, 1983)。一個光電池(photocell)檢測露之有無及一個紀錄由露水形成之溫度。這型感應器極爲準確，因儀器貴，系統易受塵垢污染，應用較少。

有許多型感應器利用吸收水氣影響電性之變化來測量(Rosenberg *et al.*, 1983; Fritschen and Gay, 1979)。磺化多苯乙烯濕度感應器(sulfonated polystyrene humidity sensor)就是利用水氣之吸收及解析作用(desorption)對電導度之效應。在植病流行學研究上連接微處理機資料蒐集系統(microprocessor-based data logger system)使用。RH 變動迅速，此型感應器可刻劃其變化(Sutton et al., 1988)。這種感應器在結氷以下溫度，尚具功能，適用週年監測 RH。感應器受濕或受污垢，功能就會喪失，輸出資料有誤差。感應器之使用期限爲 3 個月至 1 年不等，須經常校正讀數。

A.葉面濕潤觀測

露、霧、溢泌(guttation)、灌溉或雨所造成的葉面濕潤，影響葉部病原體對病害流行之效應。而且，爲許多病害預報器(disease forecaster)之關鍵要素。表面濕潤時間(duration of surface wetness)爲流行病學研究最具趣味之變數，無論量或型態，例如小滴及薄膜，都具重要性(Van der Wal, 1978)。然而，表面濕潤之觀測，不僅要注意觀測期(measurement phase)，而且要小心詮釋所讀取之資料。在闡明病理系統中組成分間之關係時，錯誤或誤解的結果，都會導致無效結論。

葉面濕潤之觀測，必須在植物冠層內實施，才具意義。在植物冠層會遇到各種變異，如植株之型態特徵、結構、密度之變異，均可能發生，必須考慮將感應器放在最適當的位置；或放置多個感應器，以反應葉面濕潤持續時間(Friesland and Schröter, 1987)。

一般而言，感應器是以間接方式測量植物表面之濕潤，觀察並記錄感應器之濕潤與否，而非濕潤植物表面。當使用機械或電子儀器時會造成一些困擾；因人工蒐集與感應器探測之表面的理化特性，並不一定相同。人造表面在露水形成及停留(retention)之過程中，可能產生不同反應，這些差異可能引致測量之濕潤時間與實際葉面及果面濕潤持續時間發生相當差異。最佳解決之道，乃在選擇感應器時，務必選擇介面與近似實際關係之寄主器官表面者。

測量葉面濕潤有兩種方法：一爲利用機械濕脹縮的效應，一爲電子感應器之電阻效應。觀測之機械儀器(Mechanical instruments)有 deWit 葉面濕時計(Post, 1959)，曾經在植病研究上有效利用(Sutton *et al.*, 1984)，其改良型可以同時記錄溫度及濕潤時間(Zuck and MacHardy, 1981)。由雨造成的濕潤時間也可以測量，而且相當準確。然而，要鑑定區別是由露水、霧或細雨所引起，這種麻線感應器效果較差(Jones, 1986)。1984 年，Sutton 指出霧週期在胡蘿蔔、蘋果、及馬鈴薯葉部可以估計相當準確(誤差＜1 hr)，但在洋蔥則在不同生長期有低估或高估的現象。這種型濕潤記錄器(Wetness recorder)應用於蘋果(Sutton *et al.*, 1987)及大豆流行病學研究上(Rupe and Ferriss, 1987)。另有利用羊小腸細長片吸濕脹縮效應之葉面濕潤計(Wallin and Polhemus, 1954)。另一種替代型機械設計，泰勒氏濕潤計(Taylor

wetness recorder)(Taylor, 1956)，採用一種特製無法抹消的鉛筆，直接觸及玻璃表面，濕潤時，畫出顯著線條，當放置妥當時，簡單的設計也可測量可靠的濕潤週期(Lomas, 1965)。

電子儀器(Eletronic instruments)，測量濕潤的電子探測裝置(eletronic sensing device)，包括兩種金屬線(wire)，一爲金屬線絲夾(wire clip)及一爲金屬片(metal strips)做爲電極(electrodes)，平行裝置，供爲人工葉面(artificial leaf surface)，有時電極可直接接觸到葉表面。夾型(clip-type)感應器，如鎳線(0.25-mm)電極，可直接繫住或夾住植物葉部(Sutton *et al.*, 1988)。如果需要進行葉面濕潤時間的空間抽樣，可以將數個夾子連接在一個平行電路(circuit)上，放置在冠層不同的高度位置。夾型感應器相當堅固，可以非常有效地用於植物器官，亦不易爲強風吹落；但是，必須定期檢查與植物體之接觸是否良好，如果植物組織受到夾傷，可能漏出汁液而顯示假的正濕潤讀數。唯一可能發生的問題，是乾組織在接觸高RH所產生的反應，感應器務須校核。

上述兩種感應器在植物流行病學研究上，已被廣泛採用。爲使感應器與觀測植物之器官反應相近，兩種感應器均可以橡膠液爲底的油漆來上漆(Sutton *et al.*, 1987)，使漆面對初始濕潤(initial wetness)高度敏感，潤濕很快就被漆吸收。1988 年，Sutton 等推薦較少添加物(additive)較便宜比高價格漆更好的配方：125 份 Pittsburg 88-6 白橡膠漆，20 份水，1 份綠色酞菁染料(phthalocyanine)。漆好之感應器在 100℃乾燥 24 小時，在蒸餾水浸漬 1 小時，再以 100℃乾燥 24 小時。這種感應器之效果與泰勒機械式濕潤記錄器功效相同，曾應用於監測苜蓿(Von Chong, 1988)、玉米(Gillespie and Kidd, 1978)、洋蔥(Sutton et al., 1978)、小麥(Huband and Butler, 1984)、及草莓(Grove *et al.*, 1985)等作物之葉面濕潤時間。

B.表面濕潤之預測

若無濕潤感應器可資利用時，而又需要濕潤時間的估計值。傳統上，以 RH ≥ 90%之小時數作爲估計值。因爲標準氣象測站，只有RH 值而無濕潤記錄。而，這種間接估計廣受採用。可惜，這種估計方法在濃密冠層條件下，如穀類作物，就不正確；對密度低(低葉面積指數)，如果樹及蔬菜作物可能比較常用(Thompson, 1981)。1979 年 Gillespie 及 Sutton 提出替代估計方式，即以雲量百分率(percent cloud cover)、風速、降水時間爲基數來換算。

如果要從其他氣象變數資料估計葉面濕時(leaf wetness duration, LWD)，必須先進行校準研究(calibration study)。在各種組合環境條件下，觀測濕時(用上述感應器之一測量)，RH 及其他變數，而後纔能根據其他變數發展出預測葉面濕時之模式。

LWD 估計模式分爲經驗(empirical)與物理(physical)兩種類型。前者相對濕度模式(RH model)，後者如能量平衡方程式(Huber *et al.*, 1992)。而，Gleason et al 發展出非參數經驗模式(nonparametric empirical model)，應用分類及迴歸樹形分析(classificaiton and regression tree, CART)及逐步線性鑑別分析(Stepwise linear discriminant analysis, SLD)。採用 CART/SLD 模式比 RH＞90%模式或人工神經網絡模式(artificial neural network model)估計 LWD 更爲準確(Francl *et al.*, 1997)。2002 年 Kim 等報告指出，將 0.3 m 高度校正 SKYBit 風速估計值輸入 CART/SLD 模式；換言之，即以 CART/SLD Wind model 與專利模式(SkyBit wetness)或 CART/SLD 模式，使用 10-m 高風速估計值作比較，無論是在宜露(20:00~9:00)或不宜露(10:00~19:00)週期內均較準確。

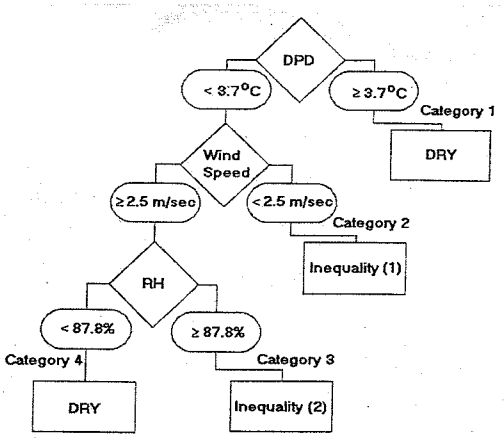


圖 5. 預測濕潤時間之分類樹形圖。

Fig. 5. Classification tree for prediction of wetness duration.

C.雨之觀測

雨(rain)爲環境變數之一，其各種屬性(attributes)對植物病害之流行影響甚鉅。其中空間與時間之若干屬性，具潛在之影響力，如降雨時間，每一時間週期內之降雨頻率及持續時間；強度特徵，如數目、大小及水滴速率，每一週期降水量(如 1 mm/hr)，水花特性(splash characteristics)、熱效應及酸度水準(acidity level)等(Fitt and McCartney, 1986)。有時，雨水對植物葉面濕潤之作用比露水還來得重要。一般圓筒狀(cylindrical)及各形雨量器，可刻劃出線條，用以區別適合的增量，須常檢測，唯一缺點無法記錄降雨時間。

目前，應用最廣泛的是傾斗式雨量計(tipping-bucket gauge)，此型式優點利於連續遙測；而其缺點則在紀錄降雨時間之靈敏度較差。連接資料記錄器之傾斗式雨量計，可記錄雨量及降雨時間。

D.土壤水分

土壤水分(Soil moisture)， 以土壤水分潛勢(soil water potential)爲指標。不僅在根部病害流行學之研究爲重要之因素，因其直接影響莖葉部分之生長，在許多莖葉病害之研究，亦列入重要因素之一。

總水分潛勢(total water potential)，由總矩潛勢(total metric potential)，溶質潛勢(solute potential)，重力潛勢(gravity potential)所構成(Hillel, 1980)。土壤水分，可能是最難測量，而且在流行學研究上最被輕忽的一個因素。

土壤水分含量(soil moisture content)可以由比較土壤樣本乾濕重量而求得：

$$\text{水分含量}(\%) = \frac{\text{濕重} - \text{乾重}}{\text{乾重}} \times 100$$

連續觀測，可採用電阻板(electrical resistance block)及熱偶乾濕球溫度表/濕度計(thermocouple psychrometer / hygrometer)。熱偶乾濕球溫度表或濕度計連續觀測土壤水分比電阻板更爲有效(Sutton *et al.*, 1988)。

土壤水分潛勢(soil water potential, bars)可以由下式求得：

$$\text{water potential} = \left(\frac{RT}{M_w}\right) \ln\left(\frac{e_a}{e_s}\right)$$

R 爲氣體常數(8.314 J/kg·degree-K·mol)，T 爲 degrees Kelvin，M_w 是水分子量(18.016)，e_a 爲土壤汽壓(vapor pressare)，e_s 爲與土壤水分同一溫度下之飽和水汽壓。

(三)風之觀測

風(wind)的最大功能，在於將傳染源或媒介從一個植物冠層傳播至另一冠層，或者從一塊田、地方、國家傳播到另一塊田、地方、國家。此外，風砂磨傷的植物表面，更易爲病原體之侵入口。

空氣在植物冠層移動現象之描述，包含水平風速平均、風向、亂流(turbulence)，如陣風(gusts)、旋風(eddies)等。雖然，亂流在傳染源釋放及分散作用不失爲主要因素之一，然而，

過去之重點都集中在平均風速及風向之觀測。多年來，平均風速之測量採用轉杯式風速表(cup anemometer)，用以測量平均風速；並且可以連接資料蒐集機系統使用。這種儀器在風速增強時之反應比減弱時爲快。在陣風時，可能超估 10–15%(Rosenberg *et al.*, 1983)。

電溫(thermoelectric)風速計及音波(sonic)風速計對低風速敏感，當有陣風或旋風，引起風速急速改變時，反應迅速，適合流行病學研究之應用(Rosenberg *et al.*, 1983)。杯形風速計僅爲水平方面，而熱電風速計是多方向的，其缺點較脆弱，須經常校正。音波風速計之缺點在冠層內之植物體反應聲音，可干擾讀數。

(四)輻射觀測

輻射(radiation)爲氣象要素之一，物體向外發射電磁波或粒子的形成及其輸送的能量(林，1986)。太陽輻射的熱效應，直接影響植物體的物理和各種生理活動的進行。植物流行病學研究很少涉及。輻射的效應，部分由於缺乏理解。此外，如 1978 年 Pennypacker 所指，許多研究者缺乏設備，可以正確地觀測植物體或病原體之輻射度(irradiance)。

輻射表(Radiometer)用來測量所有能量波長或選定之波段。最常用者，爲總輻射表(pyranometer)，又稱總日射表，用以測量直接輻射的通量(flux)。Eppley 輻射表，用黑白隔片感受面探測，元素爲熱電堆(thermopile)，根據溫差電動勢的大小，求得太陽輻射的強度(Rosenberg *et al.*, 1983)。由於電熱堆輻射表幾乎能反應整個太陽光譜，適用於植物冠層內外。而，矽光電池總輻射表(silicon photocell pyranometer)經濟精緻，可測量輻射度(irradiance)，可用於資料蒐集機系統，由於其光譜反應有限，只適合作物上面及旁邊監測。

輻射(照)度之單位爲 Wm^{-2} 或 $Jm^{-2}S^{-1}$ 有時輻射研究特定波長，如 400 nm，或超出電磁光譜(electromagnetic spectrum)之一段，例如光合有效輻射(photosynthetically active radiation, PAR)測量超出 400–700 nm，而此波段與植物對輻射的反應有關。此外，Wm^{-2} 使用在 400–700 nm 輻照度範圍內，每單位表面單位時間內光子(photon incident)數爲 PAR，即 $\mu E\ m^{-2}\ S^{-1}$，其 E(Einstein)爲一個 mole 光子。光照度(illuminance)之觀測如 lux 不能用於表徵輻射度(irradiance)，因其讀數，係調和人類眼睛對光強度之敏感性而設計。

五、監測資料之分析及應用

(一)資料之分析

1.病勢進展曲線之分析

植物族群中之病害數量(amount of disease)經過數次評估，其結果可以用病勢進展曲線(disease progress curve)集合描述。病勢進展曲線，可說是病害強度對測量時間的曲線圖(graph)，是流行病的徵象(signature)，它描述病害流行期間所有寄主、病原及環境效應發生之整合(integration)。病勢進展曲線，反應病害流行程度提供分析、比較及瞭解植物流行病之機會。每一病勢進展曲線由以下各部分組成；始發時間(time of disease onset)，始發病量(Y_0)，傳染速率(r)，發病曲線下面積(AUDPC)，曲線型態(slope)，最高發病率(Ymax)，最終發病量(Y_f)，發病持續期(overall duration)。(Campbell *et al.*, 1990)。

近廿年來，病勢進展模式化已成爲描述植物病害不可或缺的部份。而，病勢進展曲線常應用各種生長模式 (Growth model) 來配合。這些模式，可稱爲非直線型迴歸模式(nonlinear regression model)。一般常用的生長模式有以下各種：Exponential, Monomolecular, Logistic, Gompertz, Log-logistic, Richards, Weibull 模式等，如表 3 所示。

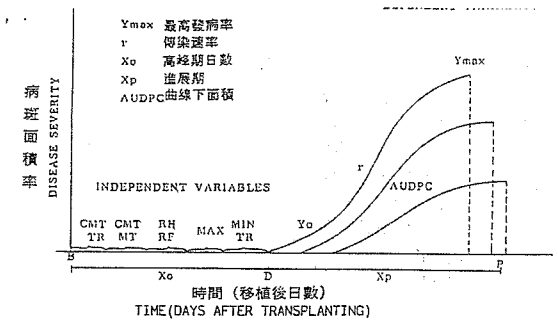


圖 6. 病勢進展曲線要素與分蘖盛期以前某期間氣象要素之關係。(Huang, 1988)

Fig. 6. Relation of elements of disease progress curve and meteorological variables.

表 3. 一般常應用於病勢進展資料分析之生長模式。

Table 3. Growth models that have been used for analysis of disease progress data.

Model	Equation
Exponential	$y=y_o \exp(r_E t)$
Monomolecular	$y=1-[(1-y_o)\exp(-r_M t)]$
Logistic	$y=1/[1+\exp(-\{\ln[y_o/(1-y_o)]+r_L t\})]$
Gompertz	$y=\exp[\ln(y_o)\exp(-r_G t)]$
Log-logistic	$y=1/\{1+[(1-y_1)/y_1]\, t^{-r_{LL}}\}$
Richards	$y=[1-B\exp(-r_R t)]^{1/(1-m)}$ if $m<1$
	$B=1-y_o^{(1-m)}$
	$y=[1+B\exp(-r_R t)]^{1/(1-m)}$ if $m>1$
	$B=(y_o)^{1-m}-1$
Weibull	$y=1-\exp\{-[(t-a)/b]^c\}$

(1)生長曲線模式中之 Y_0 及 r_*

多數病勢進展模式都有表示初發病量(Y_0)或 Y_0 之轉換值(B)，及增加速率(r)。當 t = 0，參數 Y_0(或 B)僅爲對應預測之 Y(或其轉換值)之積分(integration)。因此，其值依 t 之零點選定。假設 t = 0 在種植日，則 Y_0 即爲種植日之估計值 Y；假設 t = 0 在第一次評估日，則 Y_0 即爲種植日之估計值 Y。顯然，Y_0 爲任意常數值，只要零時之意義已知就可以詮釋。

如果數種病勢進展曲線在同一時間尺度(time scale)及零時算出，則 Y_0 可以輕易地作一比較，在病害初發時 Y 水準之差異。

速率參數 r 對應於多種生長模式(exponential, logistic, monomolecular, Gompertz, Richards)之 t 線性後斜率(slope)。而，log-logistic 模式；r、Y 之斜率對應於 In (t)。在兩個任意時間 t1 及 t2，平均 r (r)即 $r = (Y_2 - Y_1) / (t_2 - t_1)$，除環境之適宜性(favorability)外，寄主感受性(susceptibility)及病原之致病性(aggressiveness)對 r 具均決定性之影響。

(2)病勢進展曲線下面積

某些植物病並不能以上述生長模式來描述病勢之進展，可能由於 dy/dt 之波動(fluctuation)或 Y 對 t 之圖形呈不規則之型態。因此，爲了簡述病勢進展曲線用來比較及分析目的，則以 AUDPC 來做流行病之描繪因子(descriptor)。病害初發時間，r 及最終發病率(Y_f)都含於 AUDPC。AUDPC 純爲二個時點之間 Y(病害強度)積分。可以採用中點法則(midpoint rale)或梯形積分法則(trapezoidal integration method)求近似值。AUDPC 估計公式爲：

$$\text{AUDPC} = \sum_{i}^{n-1}\left(\frac{y_i + y_{i+1}}{2}\right)\left(t_{i+1} - t_i\right)$$

2.類推法分析

類推法分析又稱類比(analogues)的分析法，這是探求存在於現在中的未來因素的方法。(1)橫斷比較法：取同一時間各地之資料來作比較分析，以預測未來演變的方法；(2)先行指標法：以現在的某些現象反映出來的跡象作爲指標。現代之先行指標宜爲定量的指標，與古人之以「物候」爲徵之經驗法則不同(黃，1997)。

這類預測方法屬經驗法則(empirical rules)，又稱經驗模式(empirical model)，如像馬鈴薯晚疫病的 Hyre 氏法和 Wallin 法、蘋果

黑星病的 Mills 預測表等，都已有幾十年的歷史。稻熱病氣象型之預測法，利用 AMeDAS 資料之預測法，通發指數法之預測均屬之(黃，1990) 。

3.相關及迴歸分析之應用

病害預測爲植物病害及氣象因素之監測，主要目的之一。相關及迴歸分析爲廣泛採用的方法。

(1)簡單直線迴歸分析法

簡單直線迴歸分析式以 $Y = b_0 + b_1 X$ 來表示。係以某特定時期之個別氣象要素與病害發生程度關係所建立之模式。發生程度之表示方法，依採用之空間屬性而有不同：因此就有病葉率、病莖率、發生面積種種預測模式。以葉稻熱病爲例，日本廣島縣，以病葉率爲 Y，七月第五半旬之降水量爲 X，建立 $Y = 0.46 + 0.0126 (X - 13.04)$之關係式；宮崎縣則以病莖率爲 Y，六月中旬至七月上旬之時數爲 X，建立 $Y = -0.51X + 137.32$ 之關係式。福井縣紋枯病發生面積(公頃)可用單迴歸 $y = 245.695 - 28.56x$ 表示，x 爲前年十月至四月合計平均濕度。

(2)複線性迴歸分析法

在簡單直線迴歸模式 $Y = b_0 + b_1X$，只以一個氣象變數來解釋病害變數。事實上，影響該特定變數 Y 的並非只有一個，爲了充分且正確地解釋或預測，就有建設立複迴歸(多元迴歸)的必要。其意義和運算方法與簡單直線迴歸相似，每一自變數之值，亦皆預先選取並予固定，例如 Y 取決於 X_1、X_2、……、X_k，即複迴歸模型爲：

$$Y = b_0 + b_1X_1 + B_2X_2 + b_3X_3 + \ldots\ldots + b_kXk$$

(二)模式之應用

應用氣象因素與病勢進展關係所建立的模式，有三種類型，即經驗法則，統計模式及系統分析模式。三種模式，針對作物病害之發生與蔓延編發預報。按預報分爲發生期、發生量的預報。按預報時效可分爲長期趨勢預報、中期預報及短期預報，在病害發生幾天或十幾天前發出病害預測，屬中期預報；有些預測方法，係以每日風險指數爲預測指標，發出感染預測，屬短期預報。表 4 列舉 1966 年以來，部分病害及感染預測之實例，決定防治適期或施藥時間，以感染預測法較爲實用。

五、結語

植物病害管理總體結構，由三道防護網所組成。第一層防護網，爲摒拒病害侵入之措施。第二層防護網，爲限制病害之始發族群。第三層防護網，爲田間病害之最小限度化。第一道防護措施，主要目的爲避免作物與病原體直接接觸，如採用健康種苗，避免種子及土壤傳染波及感染之田園；包括嚴格檢疫，種子檢驗，種子健康檢查等技術措施。第二道防護措施，主要目的在生育初期，將病害族群壓制在「經濟危害水平」以下。第三道防護措施，包括採用抵抗性品種，施用農業藥劑，調整土壤酸鹼值、肥力、水管理等。其中第二、第三道防護措施與施藥防治有密切的關連。而，施藥多寡與否，受氣象因素之制約。

多年來，歐美各國植病及相關學者專家，無不努力找出適當的病害預測方法，建立防治適期的預報系統，使農藥施用量儘可能減少，做到及時、經濟而有效的防治。由於氣象因素，如溫度、水份、風及輻射等均能影響植物病害之發生及流行。因此，進行氣象因素及病勢進展之監測有助於發展預測模式，提供研判防治適期之資訊。

表 4. 應用氣象變數之預測系統。
Table 4. Selected forecasting systems based on meteorological factors.

Disease	Host	Forecasting system	Meteorological factors	Authors
葉稻熱病	水稻	BLASTAM	T, PR, DS, WS, WD	越水 (1982)
		初發期預測	T, RH	黃 (1990)
		盛行率預測	T, RH, DS, PD, PR, EV, WS, TR	黃 (1983)
紋枯病	水稻	BLIGHTAS	T, RH	川西 (1995)
早疫病	番茄	FAST	T, RH, PR	Madden & Pennyparcker (1978)
葉斑病	胡蘿蔔	感染預測	T, RH, PR	Gillespie & Sutton (1979)
晚疫病	馬鈴薯	BLITCAST	T, RH	Krause (1975)
		否定感染預測	T, RH, RF	Shrödter & Ullrich (1966)
黑點病		MERAN	T, RH, RF	小泉(1986)
露菌病	葡萄	感染預測	T, LWD, RH	Ellis et al. (2000)
串腐病	葡萄	感染預測	T, LWD, RH,RF	Broom & Aviles. (1995)
灰黴病	草莓	感染預測	T, RF, LWD, VP, VPD	Xu at el (2000)
菌核病	落花生	感染預測	RH, RF, Soil T.	Phipps at el (1997)

註：T: temperature, PR: precipitation, DS: duration of sunshine, WS: wind speed, WD: wind direction, RH: relative humidity, EV: evaporation, TR: temperature range, RF: rainfall, LWD: leaf wetness duration, VP: vapor pressure, WP: vapor pressure deficit.

因植物病害發生之型態各異，無論在病害田間抽樣調查或進行氣象變數之觀測，務必事先完善規劃，事先瞭解各種觀測儀器之特性，調查病害之屬性；瞭解分析方法及應用限制，才能進行整體研究。而研究之成功與否，與研究團隊之成員有密切關係，研究團隊中除植物保護人員外，包括氣象學、統計學、作物學及電腦技術等專技人才。以不同科技研究人員組成之團隊，對提昇預報實質功能才有助益。

六、引用文獻

林曄。1986。輻射。p.57。中國農業百科全書: 農業氣象卷。農業出版社印行，北京。

胡中庸 1966 氣候學。p. 2–3。台灣商務印書館印行，臺北市。

曾士邁、楊演。1984。植物病害流行學。p.183。農業出版社印行，北京。

黃益田。1983。稻熱病流行學之研究。IV.葉稻熱病盛行率預測模式之發展。桃園區農業改良場研究報告 1:22–37。

黃益田。1991。稻熱病預測方法及系統。臺灣省農業試驗所特刊 32:31–36。

黃益田。1994。台灣西北區之氣象因素對水稻白葉枯病盛行率之影響。桃園區農業改良場研究報告 19:27–34。

黃益田。1997。氣象資料在水稻病害發生預測之應用。p.89–106。氣象因子與作物病蟲害發生研討會論文專輯。杜金池、楊純明，主編。中華農業氣象學會出版，臺中縣。

蔡武雄、蘇鴻基。1984。水稻葉稻熱病預測 I. 氣象變數與病斑進展。植保會刊 26: 171–180。

羅樹孝。1972。水文氣象學。p.36。徐氏基金會出版，臺北市。

小林次郎。1980。葉いもち發生初期における生態と予察。p.173–177。植物防疫三十年のあゆみ。日本。

川西健兒。1995。イネ紋枯病發生預測システム(BLIGHTAS)の香川縣版の作成とアメダスデータを利用した相對濕度の推定法と紋枯病シミユレーシヨンモデルへの適用。今月の農藥 1:24–32。

田中篤哉。果樹病害の發生預測法。p.149-152。果樹 野菜栽培にねける預測と診斷。化學工業日報社發行，日本。

松本和夫。1978。コンピユーターによる稻イもち病の発生予察。今月の農薬 22(13): 14–18。

越水幸男。1982。アメダス資料による葉いもち病の発生予察法。今月の農薬 26(1): 46–53。

橋本晃。1978。結露計による葉イもち病の発生予察法。今月の農薬 22(5):46–50。

橋本晃。1978。コンピユータによる稻いもち病の發生予察について福島縣の現狀。今月の農薬 22(13):25–28。

日本農業氣象學會。1994。平成の大凶作。日本農林統計協會發行，日本。

Analytis, S. and J. Kranz. 1972. Über die Korrelaion Zwischen Befallshaufigkeit und Befallsstarke bei Pflanzenkrankheiten. Phytopathol. Z. 73:201–207.

Campbell, C.. L. and L.V. Madden. 1990. Monitoring Epidemics: Disease. p.107–128. *In:* Introduction to Plant Disease Epidemiology. A Wiley-Interscience Publication, New York..

Chester, K. S. 1950. Plant disease losses: their appraisal and interpretation. Plant Dis. Rep. Suppl. 193:190–362.

Chuang, T. Y. and M. J. Jeger. 1987. Relationship between incidence and severity of banana leaf spot in Taiwan. Phytopathology 77:1537–1541.

Coakley, S. M. 1985. Describing and quantifying the environment. Plant Dis. 69:460–466.

Croxall, H. E., D. C. Gwynne and J. E. E. Jenkins. 1952. The rapid assessment of apple scab on leaves. Plant Pathology 1:39–41.

Davis, J. M., R. I. Bruck, G. B. Runion and F. L. Mowry. 1983. An aspiration system for meteorological sensors used in epidemiological studies. Phytopathology 73:1246–1249.

Dixon, G. R. and J. K. Dodson. 1971. Assessment keys for some diseases of vegetable, fodder, and forage crops. J. Natl. Inst. Agric. Bot. (G. B.) 23:299–307.

Esker, A. B. and M. Toma-Braghini. 1981. Assessment methods for resistance to coffee leaf rust (*Hemileia vastatrix* Berk. & Br.). FAO Plant Prot. Bull. 29:56–66.

Fitt, B. D. L. and H. A. McCartney. 1986a. Spore dispersal in relation to epidemic models. p. 311–345. Plant Disease Epidemiology, Vol. 1: Population Dynamics and Management. L. J. Leonard and W. E. Fry, eds. Macmillan, New York.

Fitt, B. D. L. and H. A. McCartney. 1986b. Spore dispersal in splash droplets. p.87–104. Water, Fungi, and Plants. P. G. Agrios and L. Boddy, eds. Cambridge University Press, Cambridge.

Francl, L. J. and S. Panigrahi. 1997. Artificial neural network models of wheat leaf wetness. Agric. For. Meteorol. 88:57–65.

Fritschen, L. L. and L. W. Gay. 1979. Environmental Instrumentation. Springer-Verlag, Ner York. 216 pp.

Friesland, H. and H. Schrödter. 1987. The analysis of weather factors in epidemiology. p.115–134. Experimental Techniques in Plant Disease Epidemiology. J. Kranz and J. Rotem, eds. Springer, Berlin.

Fry, W. E., O. C. Yoder and A. E. Apple. 1984. Influence of naturally occurring marker genes on the ability of *Cochliobolus heterostrophus* to induce field epidemics of Southern corn leaf blight. Phytopathology 74:175–178.

Gillespie, T. J. and G. E. Kidd. 1978. Sensing duration of leaf moisture using electrical impedance grids. Can. J. Plant Sci. 58:179–184.

Gillespie, T. J. and J. C. Sutton. 1979. A predictive scheme for timing fungicide applications to control alternaria leaf blight in carrots. Can. J. Plant Pathol. 1:95–99.

Goster, G. J. M. A. 1974. Methods of assessing cucurbit powdery mildew (*Sphaerotheca* filigenea) in terms of fungicide evaluation. S. Afr. J. Sci. 70:7–9.

Grove, G. G., L. V. Madden and M. A. Ellis. 1985. Splash dispersal of *Phytophthora cactorum from infected strawberry fruit. Phytopathology 75:611–615.*

Hillel, D. 1980. Fundamentals of Soil Physics. Academic, New York. 413 pp.

Horsfall, J. G.. and R. W. Barratt. 1945. An improved grading system for measuring plant disease. Phytopathology 35:655 (Abstr.).

Horsfall, J. G.. and E. B. Cowling. 1978. Pathometry: The measurement of plant disease. p.119–136. Plant Disease. Vol. 2. How Disease Develops in Populations. J. G. Horsfall and E. B. Cowling, eds. Academic, New York,

Huang, Y. T. 1988. Development of models for forecasting rice leaf blast in Taiwan. Doctorate Dissertation. Tokyo Univ. Japan.

Huband, N. D. S. and D. R. Butler. 1984. A comparison of wetness sensors for use with computer or microprocessor systems designed for disease forecasting, Vol. 2. Proc. Br. Crop. Prot. Conf. p.633–638.

Huber, L. and T. J. Gillespie. 1992. Modeling leaf wetness in relation to plant disease epidemiology. Ann. Rev. Phytopathol. 30:553–577

Imhoff, M. W., K. J. Leonard and C. E. Main. 1982. Analysis of disease progress curves, gradients, and incidence-severity relationships for field and phytotron bean rust epidemics. Phytopathology 72:72–80.

Jackson, R. D. 1986. Remote sensing of biotic and abiotic plant stress. Ann. Rev. Phytopathol. 24:265–287.

James, W. C. 1971. An illustrated series of assessment keys for plant diseases, their preparation, and usage. Can. Plant Dis. Surv. 51:39–65.

James, W. C., and C. S. Shih. 1972. Relationship between incidence and severity of powdery mildew and leaf rust on winter wheat. Phytopathology 63:183–197.

James, W. C. 1974. Assessment of plant diseases and losses. Ann. Rev. Phytopathol. 12:27–48.

Jones, A. L. 1986. Role of wet periods in predicting foliar diseases. p.87–100. Plant Disease Epidemiology, Vol. 1: Population Dynanics and Management. K. J. Leonard and W. E. Fry, eds. Macmillan, New York.

Kim, K. S., S. E. Taylor, M. L. Gleason and K. J. Koehler. 2002. Model to enhance site-specific estimation of leaf wetness duration. Plant Dis. 86:179–185.

Kranz. J. 1970. Schätzklassen für Krankheitsbefall. Phytopathol. Z. 69:131–139.

Kranz, J. 1988. Measuring plant diseases. p.35–50. Experimental Techniques in plant Disease Epidemiology. J. Kranz and J. Rotem, eds. Springer, Berlin.

Krause, R. A., L. B. Massie and R. A. Hyre. 1975. Blitecast: a computerized forecast of late blight of potato. Plant Dis. Rep. 59:95–98.

Lee, S. and J. O. Rawlings. 1982. Design of experiments in growth chambers—uniformity in the NCSU phytotron. Crop Sci. 22:551–558.

Lindow, S. E. and R. R. Webb. 1983. Quantification of foliar plant disease symptoms by microcomputer-digitized video image analysis. Phytopathology 73:520–524.

Lomas, J. 1965. Note on dew duration recorders under semiarid conditions. Agric. Meteorol. 2:351–359.

Madden, L. V., S. P. Pennypacker and A. A. MacNab. 1978. FAST—a forecast system for *Alternaria solani* on tomato. Phytopathology 68:1354–1358

Madden, L. V. 1986. Statistical analysis and comparison of disease progress curves. p.55–84. Plant Disease Epidemiology, Vol. 1: Population Dynamics and Management. L. J. Leonard and W. E. Fry, eds. Macmillan, New York.

Madden, L. V. and C. L. Campbell. 1986. Descriptions of virus disease epidemics in time and space. p.273–293. Plant Virus Epidemics: Monitoring, Modelling, and Predicting Outbreaks. G.. D. McLean, R. G. Garrett and W. G. Ruesink, eds. Academic, Sydney.

Mitchell. J. M., Jr. 1980. History and mechanisms of climate. p.31–42. Das Klima-Analysen und Modelle, Geschichte und Zukunft. H. Oeschger, B. Messerli and M. Svilar, Eds. Springer-Verlag, Berlin.

Moore, W. C. 1943. The measurement of plant diseases in the field. Trans. Br. Mycol. Soc. 26:28–35.

Pennypacker, S. P. 1978. Instrumentation for epidemiology. p.97–118. Plant Disease. Vol. 2: How Disease Develops in Populations. J. G. Horsfall and E. B. Cowling, eds. Academic, New York,

Phipps, P. M., S. H. Deck., D. R. Walker. 1997. Weather-Based crops and disease advisories for peanut in Virginia. Plant Disease 81(3):236-244.

Post, J. J. 1959. Het instrumentarium voor het bepalim van infecteperioden. Meded. Dir. Tuinbow Neth. 22:365–371.

Rayner, R. W. 1961. Measurement of fungicidal effects in field trials. Nature 190: 328–330.

Rosenberg. N. J., B. L. Blad and S. B. Verma. 1983. Microclimate: The Biological Environment. Wiley, New York. 495 pp.

Rotem, J. 1978. Climate and weather influence on epidemics. p.317–436. Plant Disease, Vol. 2: How Disease Develops in Populations. J. G. Horsfall and A. E. Dimond, eds. Academic, New York.

Rouse, D. I., D. R. Mackenzie, R. R. Nelson and V. J. Elliott. 1981. Distribution of wheat powdery mildew incidence in field plots and relationship to disease severity. Phytopathology 71:1015–1020.

Rupe, J. D. and R. S. Ferris. 1987. A model for predicting the effects of microclimate on infection of soybean by P*homopsis longicolla.* Phytopathology 77:1162–1166.

Seem. R. C. and H. D. Gilpatrick. 1980. Incidence and severity relationships of secondary infections of powdery mildew on apple. Phytopathology 71:947–950.

Seem, R. C. 1984. Disease incidence and severity relationships. Ann. Rev. Phytopathol. 22:137–150.

Seem, R. C. and S. P. Eisensmith. 1986. What's wrong with the Julain day? Phytopathology 76:41.

Shaner. G. E., R. M. Peart, J. E. Nenman, W. L. Stirm and O. L. Lower. 1972. EPIMAY. A plant disease display model: An evaluation of the computer simulator for Southern corn leaf blight in Indiana. Purdue Univ. Agric. Exp. Stn. Res. Bull. 890. 15pp.

Shaner, G.. and R. E. Finney. 1977. The effect of nitrogen fertilization on the expression of slow-mildewing resistance in Knox wheat. Phytopathology 70:183-1186.

Shaw, M. W. and D. J. Royle. 1987. Spatial distributions of *Septoria nodorum* and *S. triticii* within crops of winter wheat. Plant Pathol. 75:936–939.

Strandberg, J. O. 1988. Establishment of Alternaria leaf blight on carrots in controlled environment. Plant Dis. 72:522–526.

Sutton, J. C., C. J. Swanton and T. J. Gillespie. 1978. Relation of weather variables and host factors to incidence of airborne spores of *Botrytis squamosa.* Can. J. Bot. 56:2460–2469.

Sutton, J. C., T. J. Gillespie and P. D. Hildebrand. 1984. Monitoring weather factors in relation to plant disease. Plant Dis. 68:78–84.

Sutton, T. B., E. M. Brown and D. J. Hawthorne. 1987. Ecology and epidemiology of *Mycosphaerella pomi*, cause of Brooks fruit spot of apple. Phytopathology 77: 431–432.

Sutton, J. C., T. J. Gillespie and T. D. W. James. 1988. Electronic monitoring and use of microprocessors in the field. p.99–113. Experimental Techniques in Plant Disease Epidemiology. J. Kranz and J. Rotem, eds. Springer-Verlag, Berlin.

Taylor, C. F. 1956. A device for recording the duration of dew deposits. Plant Dis. Rep. 40:1025–1028.

Tehon, L. R. and G. L. Stout. 1930. Epidemic diseases of fruit trees in Illinois 1922–1928. *Ill.* Nat. Hist. Surv. Bull. 18:415–502.

Thompson, N. 1981. The duration of leaf wetness. Meterol. Mag. 110:1–12.

Tottman, D. R. and R. J. Makepeace. 1979. An explanation of the decimal code for the growth stages of cereals, with illustrations. Ann. Appl. Biol. 93:221–234.

Van der Wal. A. F. 1978. Moisture as a factor in epidemiology and forecasting. p.253–295.Water Deficits and Plant Growth. Vol 5. T. T. Kozlowski, ed. Academic. New York.

Waggoner, P. E. and R. D. Berger. 1987. Defoliation, disease, and growth. Phytopathology 77:393–398.

Wallin, J. R. and D. N. Polhemus. 1954. A dew recorder. Science 119:294-295.

Weltzien, H. C. 1978. Geophytopathology. p.339–360.Plant Disease, Vol. 2: How Disease Develops in Populations. J. G. Horsfall and E. B. Cowling, eds. Academic, New York.

Weltzien, H. D. 1988. Use of geophytopathological information. p.237–242. Experimental Techniques in Plant Disease Epidemology. J. Kranz and J. Rotem, eds. Springer, Berlin.

Xu, X. M., D. C. Harris and A. M. Berrie. 2000. Modeling infection of strawberry flowers by Botrytis cinerea using field data. Phytopathology 90:1367–1374.

Zuck, M. G.. and W. E. Machardy. 1981. Recent experiences in timing sprays for control of apple scab: Equipment and test results. Plant Dis. 65:995–998.

Analysis and Monitoring of the Relations of Meteorological Factors to Plant Disease Epidemics

Yih-Tyang Huang
Taoyuan District Agricultural Improvement Station, Council of Agriculture, Taoyuan, Taiwan, ROC
E-mail: ythuang@mail.coa.gov.tw

ABSTRACT

This paper contains reviews of monitoring of the meteorological factors and the plant disease epidemics in the field and also of analysis of their relationships. For monitoring of disease epidemics, attributes of disease, timing and frequency of assessment and procedures for disease assessment, such as disease diagrams and scales, as well as remote sensing, are included. For monitoring of the environment for epidemiological studies, measurements of meteorological variables are discussed, including temperature, moisture (relative humidity, leaf wetness, rain, and soil moisture), wind, and radiation. Temporal analysis of epidemics, i.e. description and comparison of disease progress curves, including initial disease (Y_o), rate parameter (r), area under the disease progress curve (AUDPC), maximum disease severity (Ymax) and development of forecasting models through a study of the relationships of weather variables and disease epidemics are elucidated.

Key words: Meteorological factor, Plant Disease Epidemics, Disease monitoring and analysis.