

長期氣象預報在作物產量預測之應用 (邀請論文)

孔 震 村

密蘇里大學哥倫比亞校區大氣科學系

摘 要

將氣象因子用於作物產量預測的研究已有七十多年的歷史。但現時盛行之多因子迴歸預報方式用於實際作物預報只有十多年之久。近年作物預測模式的發展，主要歸於電腦資料處理之進步，氣象觀測網之充實，以及國際農業政策與農產市場之迫切需要所致。美國聯邦及各州農業機構現已大都採用作物模式預測，而一般預測成績已相當優良。平常預測產量已達到實際產量之5%左右之誤差範圍內。但在異常氣候年，誤差可達至20~30%左右。

台灣地區作物生產模式之研究，雖只有十多年歷史，模式的預報能力顯然已達到國際水準，並有獨到之優點。台灣作物模式之成功主要歸功於研究人員的素質優良，以及台灣完整的長期氣象記錄。因而能適當地應用小尺度（鄉鎮單位）氣象記錄，配合同尺度產量記錄，使預測產量之誤差有效地收縮，這正是台灣作物模式研究的優異條件。

現時預報模式利用作物生產的初、中期甚至後期氣象資料，因此模式之預報期間（Lead Forecast Time）只有收穫以前之2~4個月間，而且如果模式中氣象因子收到異常氣候之意外影響時，產量預測會更受影響。長期季節預報既已至可利用之程度，現時預測模式研究之主要目標應為如何以長期季節預報量代替現有模式中之氣象變數。如此預報時間可延至一季節至一年之長。1988年初夏美國中西部農業地域之大旱災，已被吾等用太平洋中北部冬、春季海溫預報成功。台灣地區梅雨期與颱風期長期預報之研究現在正在進行中，台灣產量預測模式似可配合長期預報研究同時發展。應用長期季節預報量，將需考慮並實驗各種預報量與參數以代替現有模式中生產期氣象變數。又為國家經建與外貿著想，亦似擬應考慮發展研究國外作物預測模式。

前 言

氣象因子用於主要農作物產量之預測乃是現今氣象學與農業經濟學最重要共同課題之一。七十多年前Smith（1914）和Wallace（1920）發表過廣泛的相關研究，以分析美國玉米地帶氣候因素對玉米產量的影響。英國Fisher（1925）亦曾以多因子迴歸方式分析過氣候因子對小麥產量。但現時盛行之多因子迴歸產量模式預測，則始於愛荷

華大學 Thompson 教授 (1969 a, b, 1970, 1986)。自 1960 年代後期以至現在，由於電腦資料處理之進步，氣象觀測網之充實，農業氣象各方面 (作物生理、需水、土壤、農業工程等等) 本身之進步，以及國際農業政策與農產市場對異常氣象之敏感，產量預報模式已被聯邦與州級機構普遍採用。現時作物產量預測已成為釐訂國家政策以及推動外貿不可或缺的工具。

本文將概述現今美國通用作物產量模式利用氣象資料之方式，進而檢討比較台灣地區產量模式之得失。然後自現時長期季節預報之進展，討論用季節預報量代替作物產量模式中氣象變數以延長模式預報期間 (Lead Forecast Time) 之可能，以及有關技術問題。

美國作物產量預測模式之現況

美國現時實際應用與研究中的產量預測模式皆可求其淵源於 Thompson 之多因子迴歸方式。雖然建立模式之實際步驟有諸多差異，最先須自產量記錄分離長期趨勢。在美國一般自 1930 年代至 1970 年代，作物產量有直線上升之趨勢，但以後此趨勢已大致穩定或甚至下降。這是所謂技術趨勢 (Technical Trend)，歸因於雜交品種推廣、肥料改進、病蟲害防治等等作物生理、病理、育種及管理各方面之技術進步。這個長期趨勢亦可分為幾段來考慮其意義。例如圖 1，Thompson 說明 1960 至 1972 的急激增產為施肥與第一代雜交品種推廣之結果，而 1970 年以降的緩慢傾向為氣候長期變動之結果。

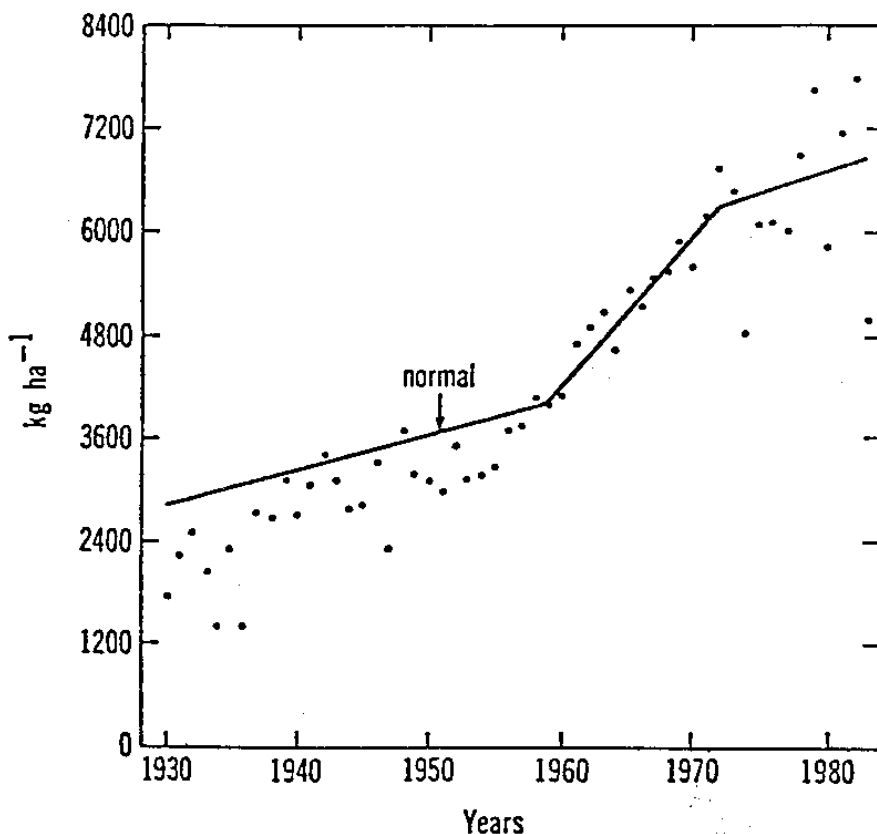


圖 1 美國玉米地帶五州正常氣象下之長期產量趨勢 (Thompson, 1986)
Fig. 1 The trends in yield of corn in the five central Corn Belt states with normal weather and average corn yields each year from 1930 to 1983. (After Thompson, 1986)

從每年產量除去長期趨勢以後，剩餘量即由於生長期氣象因素的變動，而可加以迴歸分析。這些變動量亦可用標準偏差將其常態化。每一種選出的氣象變數對產量之影響以二次函數 (Parabolic or Curvilinear Fashion) ($b_1X + b_2X^2$) 表示。在此平方項 b_2X^2 與其所由來的非線形假設極為重要。因為作物生長期間氣象變數對生長的影響以及氣象變數互相作用皆極複雜，絕非單純線形假設 (Linear Assumption) 所能描寫。個別產量預測模式雖有相當出入，其共同方式即可依下列方程式表示：(見 Achutuni, 1978 ; McQuigg, 1975 ; Sakamoto, 1978 ; 朱, 1976 ; 郭, 曾, 楊, 鄭, 1980)。

$$Y = a + \sum_{i=1}^M b_i t + \sum_{i=1}^M c_i t^2 + \sum_{j=1}^N d_j x_j + \sum_{j=1}^N e_j x_j^2 + \sum_{k=1}^P D_k$$

式中 Y 為單位面積預測產量

a 為起點值

b_i, c_i 分別為產量時間趨勢 (技術進步趨勢) 之第 i 個一次及二次曲線迴歸係數

t 為時間 (年)

d_j, e_j 分別為第 j 個氣象變數之一次及二次曲線迴歸係數

x_j 為第 j 個氣象變數 (觀測值, 觀測值與累年平均相差或常態化觀測值)

D_k 為第 k 個特殊災害函數

此為一般模式。實際模式通常祇包括重要幾項。氣象變數之選擇即依農業氣象條件而迥異。主要從生育期間幾個臨界時期有控制作用之氣象條件中，依逐步迴歸等適當分析方法選出。這個一般模式不但對農作物，亦可應用於畜牧生產以及其他受氣象影響之產業管理。圖 2 為 Thompson (1986) 美國玉米地帶產量模式中包括的氣象因素對玉米產量之影響。此為典型之美國大規模農產預測之方式。

自 Thompson 以及現今產量模式發展應用之情形可概括於圖 3。現時較好模式之預報準確度大致在 5% 誤差之範圍內（如實收為 100 bu./acre，預測則大致在 105 ~ 95 bu./acre 之範圍內）。但如氣象變數有極端性的變動，模式預報量之準確度可降至 30% 左右。換言之；如氣象條件於生長期間突然有未預料到之極端情況（如異常乾旱、水災、颶風災、異常寒冷等等），則根據正常氣象變動的模式不能準確預報。產量預報模式之另一用途，即估測氣候變動對農產可能之影響。如現在各方面關心之 CO₂ 問題，先預測 CO₂ 增加以後各地氣候之轉變，以氣候之轉變預測量代替氣象變數，求出產量所受影響。但於此主要問題，乃於正確求 CO₂ 增加以後氣候的可能反應。

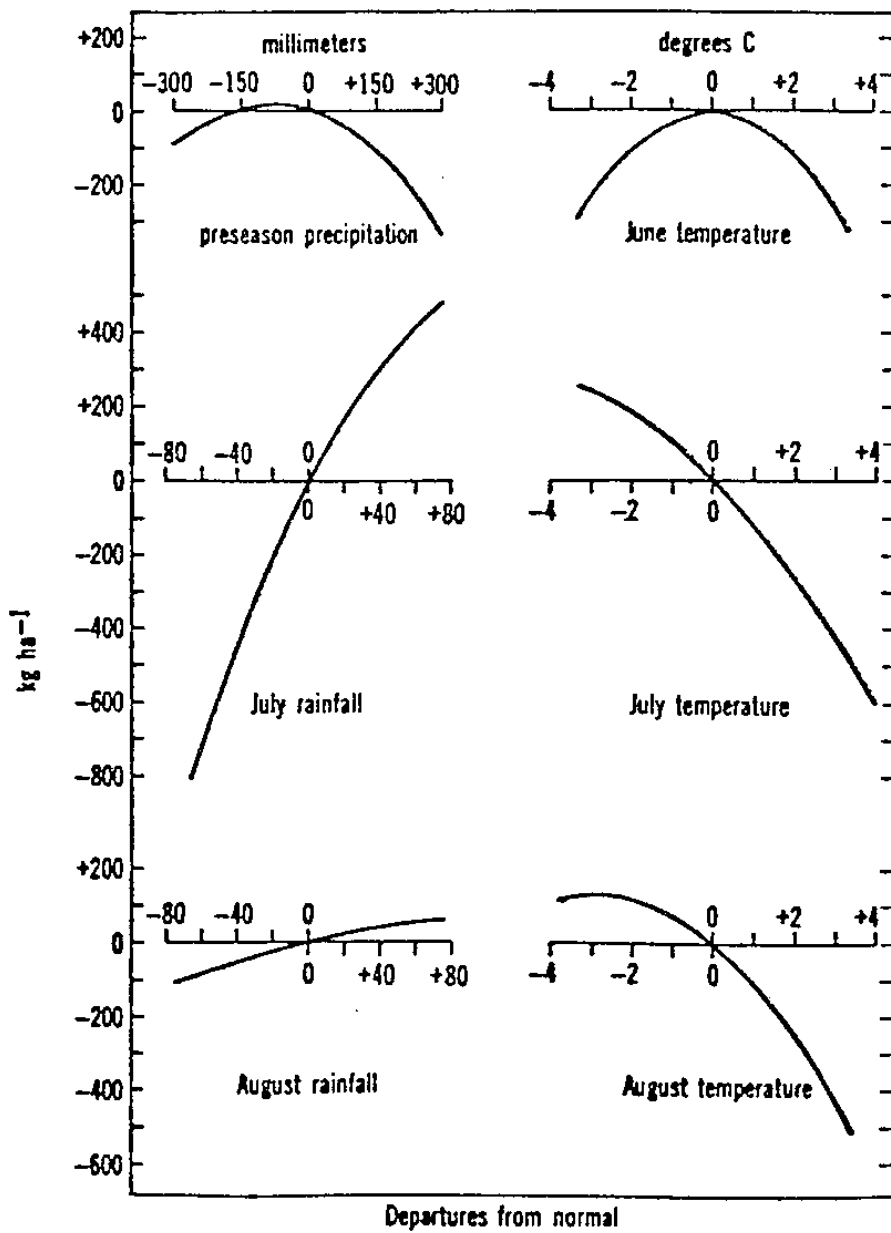


圖 2 美國玉米地帶五州玉米產量對氣象因子之反應 (Thompson, 1986)
 Fig. 2 The response of corn to weather variables in the five central Corn Belt states. (After Thompson, 1986)

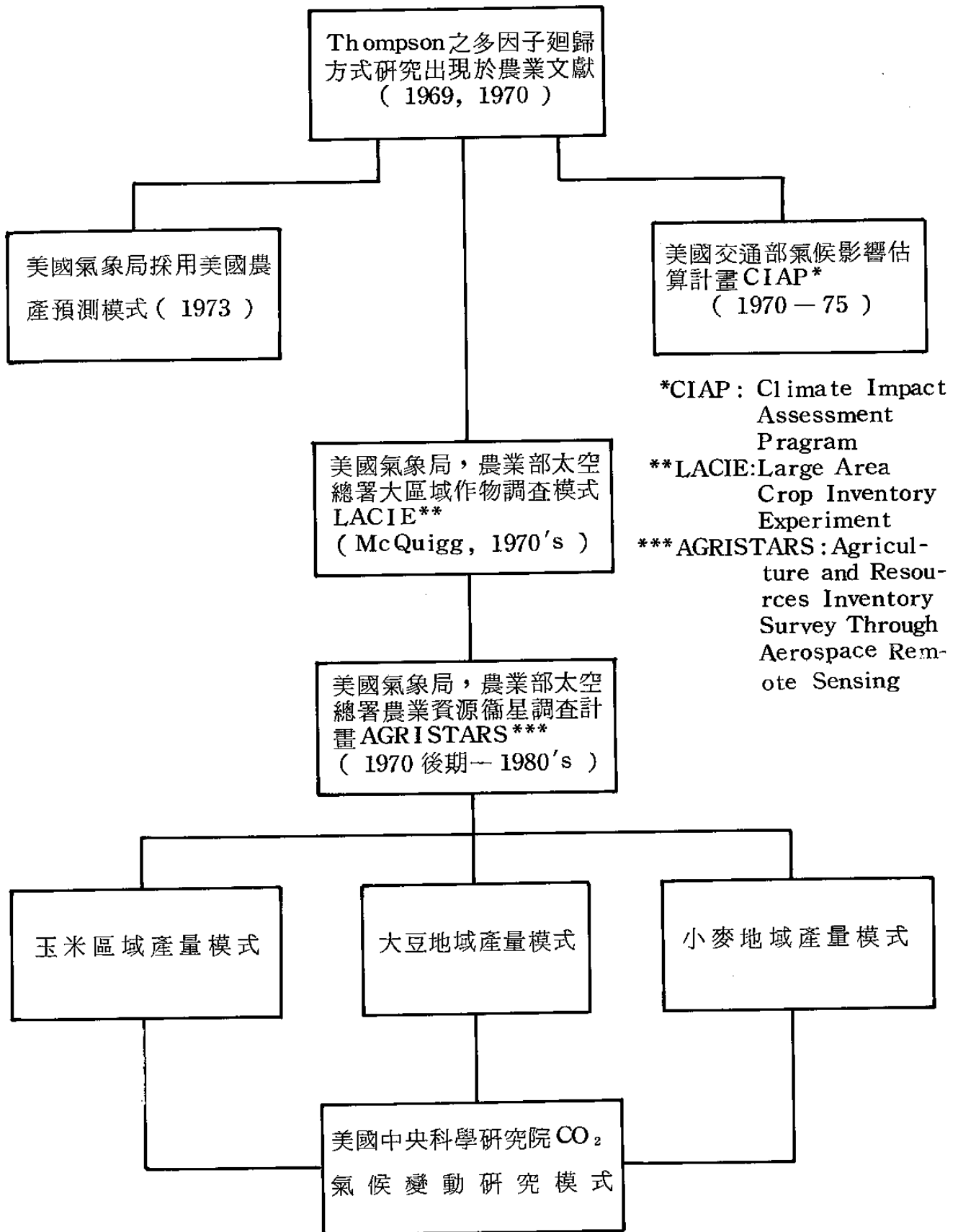


圖 3 美國氣象統計模式預測作物產量之進展

Fig. 3 Development of Statistical Models for Estimating Regional Agricultural Production in the U.S. (1960-1983)

台灣作物模式之預報能力

根據朱(1976)，郭、曾、楊、郭(1980)研究報告，台灣產量模式已有良好的基礎。郭、曾、楊、鄭(1980)之十六鄉鎮水稻產量預測模式估測產量與實際產量差異甚少。有時差異較大者即由於颱風、豪雨、病蟲害等所致。筆者對這幾年來台灣模式之進步並不熟悉。但自郭、曾、楊、鄭(1980)所報告，與美國這幾年情形之比較，可舉出一般台灣產量模式之幾個優點：

1. 預測能力顯然已達到美國產量模式一般準確性。遇到特殊災害時成績相差之情形，亦可相比於美國模式不能把握特殊氣候變化之情形。無論如何，台灣模式已有實用化需要之準確性。

2. 以鄉鎮為單位之產量預測為很小規模之預測，此與美國一般以州或幾州為單位之極大規模預測顯然大異。配合小區域之預報，台灣已有長時期以鄉鎮為單位之優良氣象記錄。就預測試驗成績察看，氣象記錄範圍與預報區域於模式中顯然有尺度之平衡。此與美國大區域往往只靠幾個氣象站記錄之情形，大不相同。

3. 台灣研究人員多出身於農科之優秀人才，對作物生理與生長環境考慮周到。特殊災害係數之設置尤為適當。總之，台灣地域農業氣象特殊之環境與要求於模式中已有充分顧慮到。

雖然台灣已有產量預測模式研究之優良基礎，而且將研究之結果應用於實際應用並不難，今後研究與應用似仍有改進發展之餘地。此情形亦與美國情形略有相似。這些包括：

1. 預報期間(Lead Forecast Time)似可延長。計有兩種含義。一即將模式中生長初、中期氣象變數以長期季節預報量代替。二即於現有模式中避免用生長後期之氣象變數。如果於生長中、後期有顯著之災害，應用補充預報之方式。關於前者，將於次節詳加描述。至於後者於迴歸分析時略加調節即可。

2. 現時產量模式之應用尚在草創期。多方基礎問題須待將來研究。台灣亦非例外。此將包括模式中迴歸係數穩定性、最適尺度、產量預測模型與作物生長模式之關係，可用於預報之氣象因素之檢驗、產量模式與經濟模式之連繫等等。生長模式以數值方式敘述作物生理生長，進而預測單位面積產量。現在雖離實用還遠，不久的將來作物生長之數值描寫進步以後，很可能與小區域產量預報相輔而行。

3. 台灣已有長期之良好氣象記錄。為配合作物產量模式以及生長模式之研究與實用，應當積極考慮擴充現有氣象觀測點為精密完美觀測網。此亦為農業資源運用之基礎事業。

長期預報於產量預測之應用

現時作物產量預報用作物生長初、中後期甚至後期氣象變數為預報因子。因此模式所給預報期間多不過 2~4 個月，有時甚至只有 1 個月。如何延長預報期間乃是作物產量預報於經濟計畫，政策執行以及國際貿易能否積極貢獻之關鍵。延長預報期間之唯一方法為以長期季節預報量代替產量模式中實際觀察之氣象變數。長期預報為現今氣象學最受注意之一門。由於氣象學近三十年來長足進步，長期季節預報已由過去單純統計分析，變為以動力學、熱力學為基礎之現代預報方法。方法上雖然用統計手段，但其對象為有預報性 (Predictability) 之動、熱力學變數，而且模式所描述者必須符合大氣環流理論之原則。長期預報能有一個季節至一年之預報時間。但其預報量為大氣環流之統計性質，而非某一天可能觀測到的變量。例如，月平均氣溫、月總降雨量、梅雨開始 (入梅期)，颱風頻率等等，而非某天某鄉之氣溫雨量等。因此這些預報量用於產量模式時，需重新建立迴歸系統，而且所適用之預報地域亦需擴大 (如台灣北、中、南、東部等) 以求得時間與空間尺度之平衡。

關於現時長期預報之發展與可能用途，筆者將就其 1988 年美國初夏大旱災預報之實際經驗加以論述。筆者與其研究員生根據其印度季風與中緯度農業地帶季節預報之研究 (Kung and Sharif 1980, 1982; Kung and Tanaka, 1985) 確定中緯度冬夏季節現象皆有相當之預報性。除了短期氣象系統之發展完全由動力學上初期資料 (即用於數學動力模式之初期值) 以外，長期氣象系統之發展即由海洋潛熱與顯熱放出於大氣之情形 (量與區域) 而定。而熱量放出即依海溫 (Sea Surface Temperature 或 SST) 調節。依是海溫之分佈與變化情形將是長期預報最重要變數之一。

氣象觀測得到之變量是由許多時間與空間不同尺度之變化綜合而成。這些變化由緯度輻射能分佈、海陸分佈、各種地形影響、季風生成，不同尺度間交互作用等等複雜原因 (Forcing Function) 而來。因此處理長期氣象變量，必須將變量於空間時間之分佈加以適當處理，分離出有物理意義之成份。(如常見之空間或時間系列之調和分析即其一例)。現時最強有力之分析方法之一為主成分 (Principal Component Analysis 或 EOF — Empirical Orthogonal Function) 分析。利用自分析出來各成分中變方 (Variance) 較大者與潛在之預報因子 (在此即海溫) 相對做時間系列之相關分析 (Crosscorrelation Analysis)。因為每個主成分有不同之變動尺度或原因 (Forcing Function)，依此可分析影響或決定氣象變量之各種不同之因果關係。

筆者等 (Park and Kung, 1988) 將美國夏季 (六、七、八月) 平均溫度加以主成分分析，而得到三個主要成分。其變方各為 31.3, 19.3 及 14.9 %。

圖 4 為第一、二、三個有向量 (Eigenvector) 與主成分之經年變化。依圖 3，美國中西部主要農產地帶以至東部之大區域完全由第一主成分控制。亦即找出與第一個成

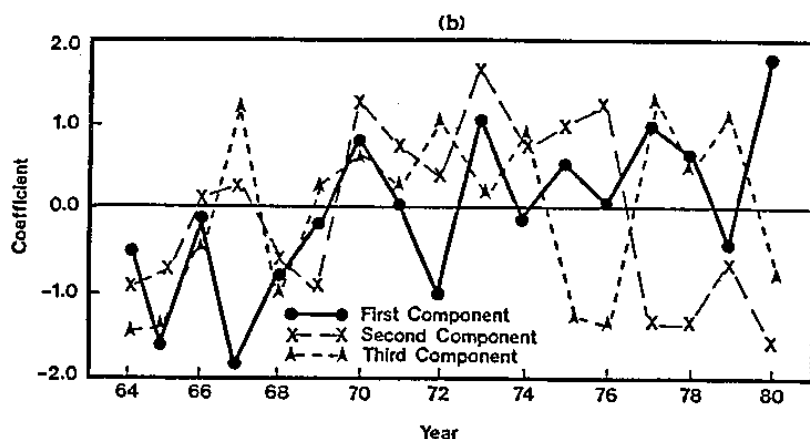
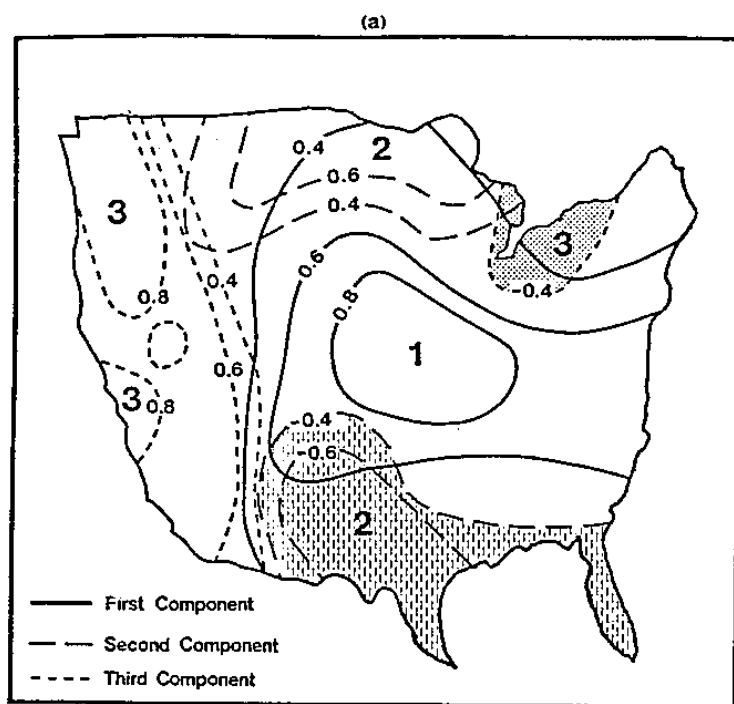


圖 4 (a)美國夏季氣溫第一、二、三個月向量分佈
(b)第一、二、三主成分係數年變化 (Park and Knng, 1988)

Fig. 4 (a) Characteristic patterns for the first three components of the summer surface temperature of North America and (b) the coefficients of the corresponding principal components. Heavy numbers represent the centers of positive or negative regions of corresponding components. (After Park and Kung, 1988)

分有顯著相關之預報因子即可預報美國主要農產地帶夏季溫度。將第一成分與海溫做時間系列之相關分析 (Crosscorrelation Analysis) 我們得到圖 5，即美國夏季氣溫第一成分與太平洋季節海溫經年時間系列之相關分佈。相關係數之分佈顯然表示，夏季美國溫度與中部北太平洋海溫很強的負相關關係。換言之，冬季或春季中部北太平洋海溫有負偏差時，美國中西部的夏天會熱，有正偏差時即有較冷的夏天。這個海溫資訊於秋季即可發現，而至冬季春季時最強。

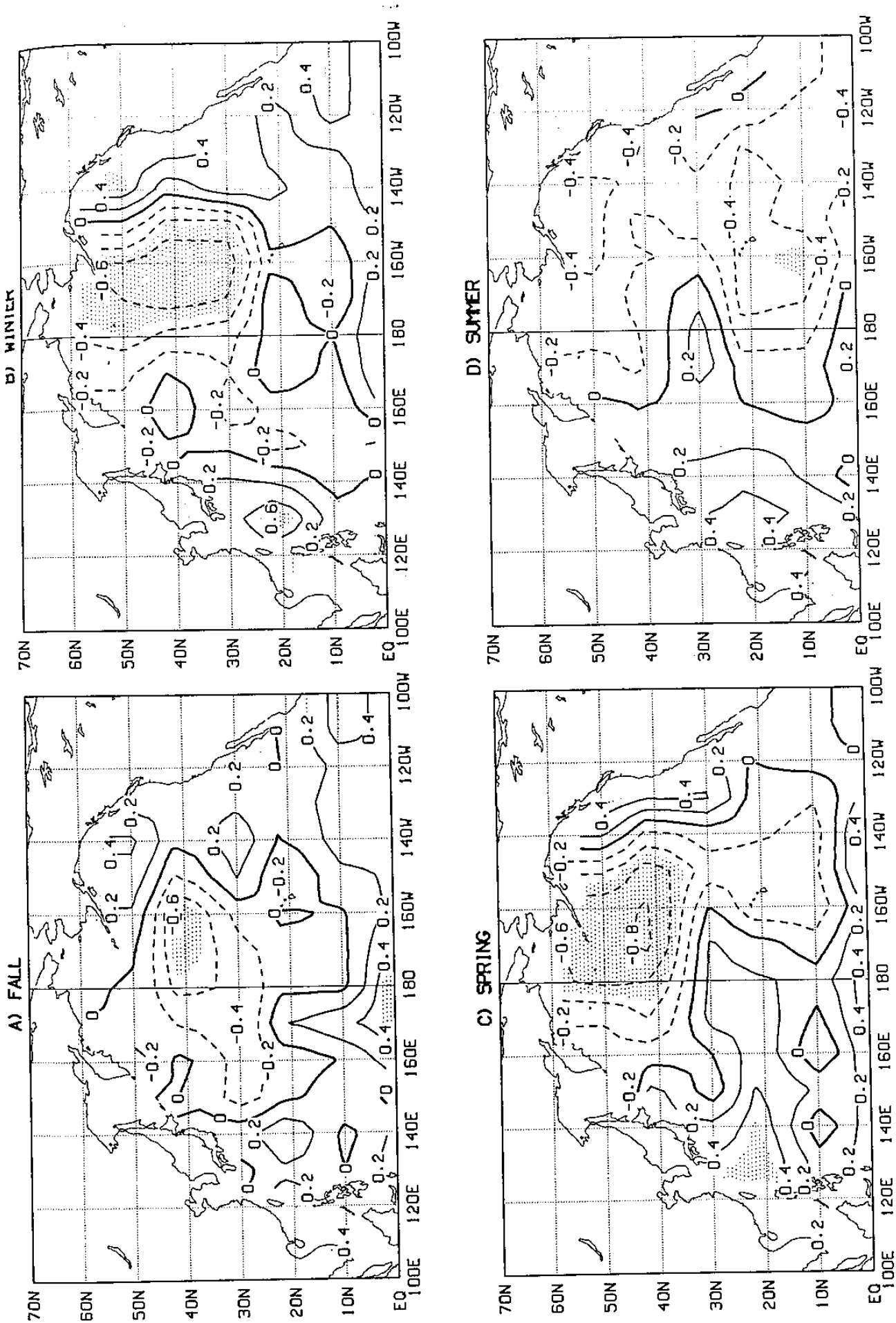


圖 5 北太平洋四季海溫與美國夏季溫度第一主成分相關

Fig. 5 Cross-correlation between the seasonal SST and the first component of the North American summer temperature. Shaded areas indicate correlations exceeding the 5% level of significance.

Isopleths are drawn for each 0.2.

圖 6 為 1987 年晚秋，1988 年冬、春之月平均海溫偏差，由美國氣象局氣候分析中心發佈者。於 11 月中已可看出中部北太平洋略有負區之生成。至 1 月這負區到達 -1°C 之大。與圖 5 之 $0.4 - 0.6^{\circ}\text{C}$ 比較，此為極大之負偏差，亦在預告美國中西部至東部酷暑之即將來臨。圖 7 為美國長期夏季雨量記錄之主成分分析裏第一成分之個有向量分佈與經年變化。與圖 5 之溫度分析比較可看出於美國中西部夏季雨量與氣溫略有相似。因此，此區有顯著高溫時，乾旱狀態亦隨之而到。（其實中西部長期記錄即如此）。因此中部北太平洋海溫於 1988 年冬、春之極端負偏差所預報之夏季高溫亦即夏季旱災之預告。海溫狀況可經常由分析中心發佈。而此特殊情況一般農民亦可推測夏季溫濕狀態。但如這些相關關係納入產量預測模式，當然需要以適當函數定量化。圖 8 即中西部夏季溫度與北太平洋預報因子區域相關之一例。

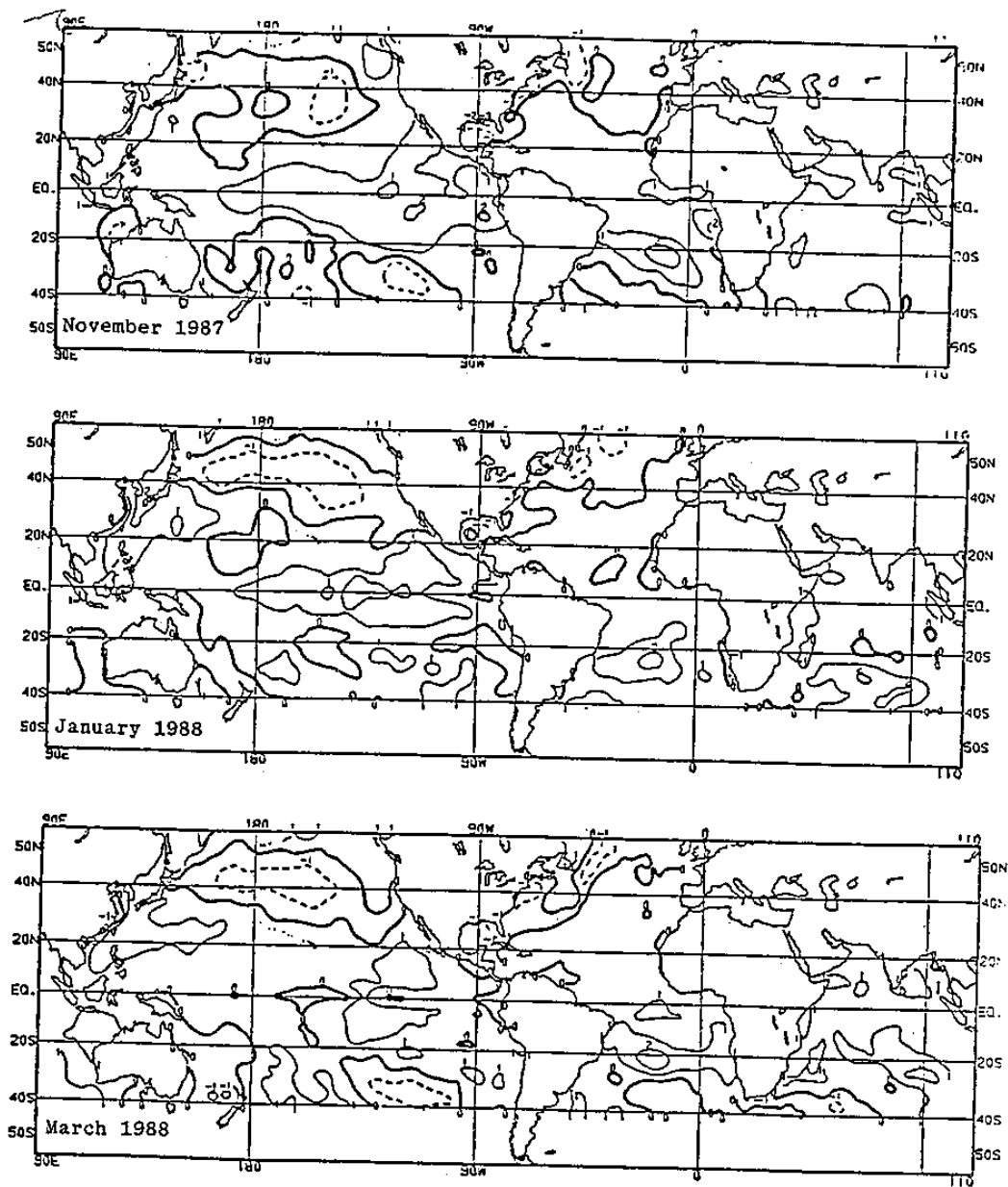


圖 6 北太平洋 1987 年 11 月，1988 年 1 月、3 月海溫偏差 ($^{\circ}\text{C}$)

Fig. 6 Sea Surface Temperature anomalies for November 1987, January 1988, and March 1988. Contour interval 1°C with negative anomalies dashed.

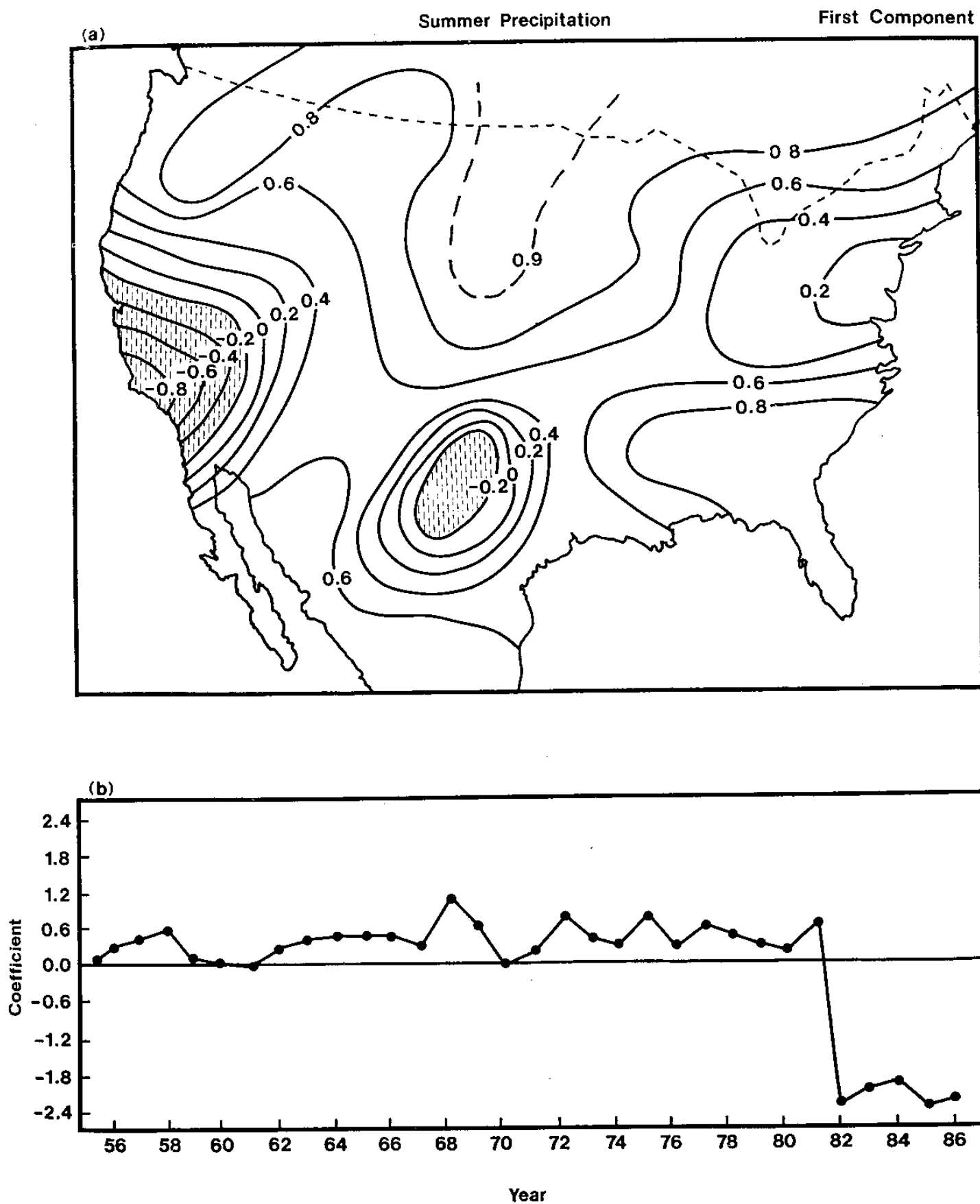


圖 7 (a)美國夏季降水量第一個向量分佈 (b)第一主成分係數年變化

Fig. 7 (a) Characteristic patterns for the first three components of the summer precipitation of North America and (b) the coefficients of the corresponding components.

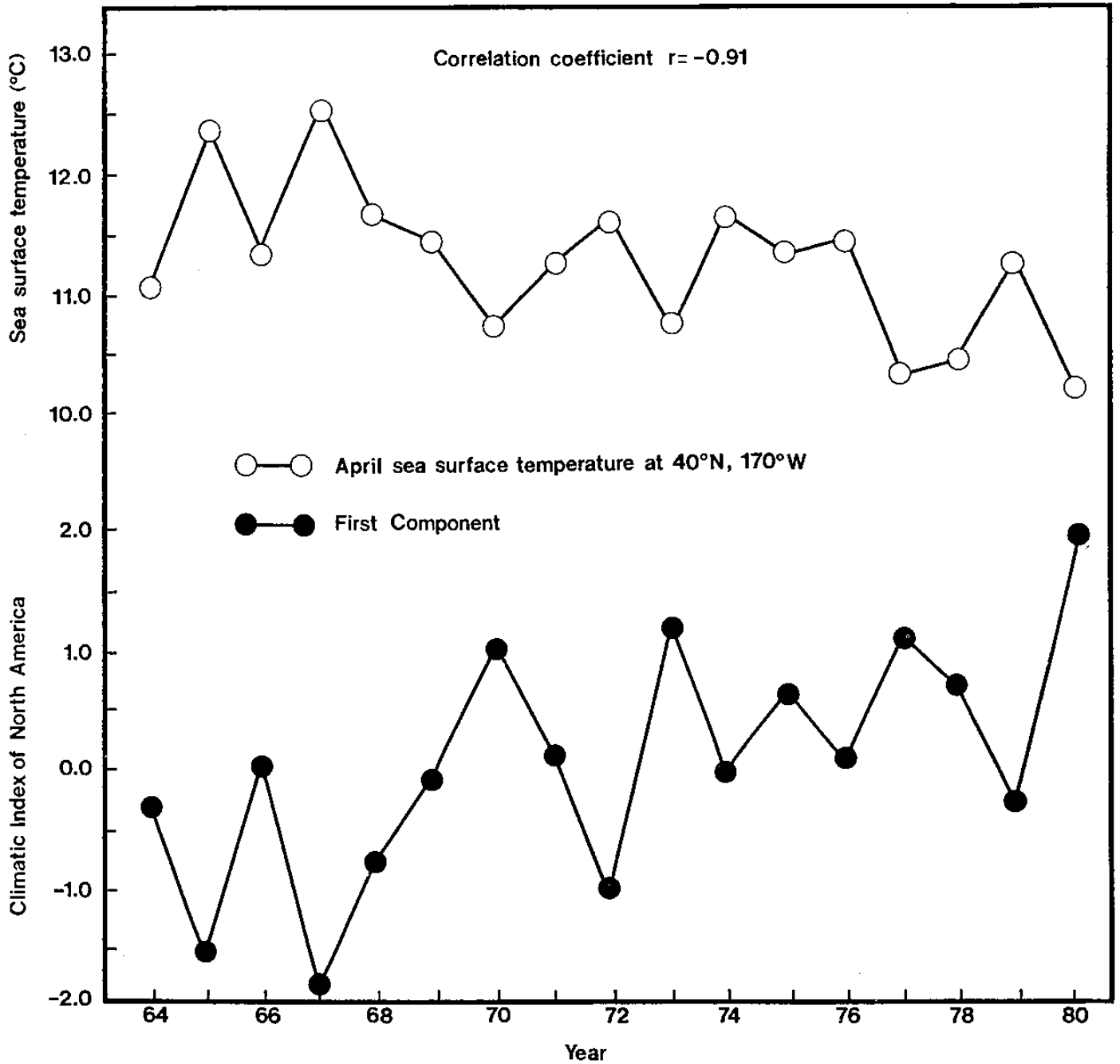


圖 8 美國中部北太平洋四月海溫及美國夏季溫度第一主成分（氣候指標）經年變化
 Fig. 8 Interannual variations of the central North Pacific SST (°C) in April and the coefficients of the first component of the North American summer temperature.

結 論

長期預報之用途甚廣。雖其研究發展仍在萌芽初期，以後幾年中迅速之進步可期而待。此時考慮以長期預報量代替產量模式中生長期氣象變數似甚合適。現在中央氣象局正努力研究，建立梅雨與颱風長期預報之模式與執行程序。針對產量預測模式之發展，配合長期預報研究，產量模式方面之基礎問題必須並行研究。雖然利用長期預報量之產量預報，比現時通用生長期氣象變數之方式較為粗放，但其預報期間為一個季節至一年，在經建政策與國際貿易之擬定與執行上將有極大之價值。此外以長期預報測定國外農產之產量亦應可考慮。外際貿易是多邊性的，長期預報應用於國外農業產區亦並非難事。建立幾個國外主要農產地域產量預報模式，可與台灣地區模式相輔並用，於經建外貿之貢獻亦可期而待也。

參考文獻

1. 朱良基 1976：台灣西部地區水稻最適產量預測方程式釐定之研究，中國統計學報第十四卷第二期，5224～5229。
2. 郭文鑠、曾文柄、楊之遠、鄭淑賢，1980：台灣地區氣象因子與水稻產量預測模式之初步研究，中央氣象局氣象學報第二十六卷第一、二期，71～76。
3. Achutuni, V. R., 1978: Crop calendar based corn yield models for Iowa and Illinois. Doctoral Dissertation, Department of Meteorology, University of Oklahoma at Norman, Oklahoma.
4. Fisher, R. A., 1925: The influence of rainfall on the yield of wheat at Rothamsted. *Phil. Trans. Roy. Soc., London Ser. B.* 2B, 89–142.
5. Kung, E. C. and T. A. Sharif, 1980: Regression forecasting of the onset of the Indian summer monsoon with antecedent upper air condition. *J. Appl. Meteor.*, 19, 370–380.
6. Kung, E. C. and T. A. Sharif, 1982: Long-range forecasting of the Indian summer monsoon onset and rainfall with upper air parameters and sea surface temperature. *J. Meteor. Soc. Japan*, 60, 672–681.
7. Kung, E. C. and H. Tanaka, 1985: Long-range forecasting of temperature and precipitation with upper air parameters and sea surface temperature in a multiple regression approach. *J. Meteor. Soc. Japan*, 63, 619–631.
8. McQuigg, J. D., 1975: *Economic Impacts of Weather Variability*. Atmospheric Science Department, University of Missouri-Columbia.
9. Park, C.-K., 1988: Principal components of the North American summer temperature field and the antecedent oceanic and atmospheric conditions. *J. Meteor. Soc. Japan*, 66 (In Press).
10. Sakamoto, C., 1978: Reanalysis of CCEA I, U.S. Great Plains Wheat Yield Models. Center for Climatic and Environmental Assessment Technical Note No. 78-3, Columbia, MO.
11. Smith, J. W., 1914: The Effect of Weather Upon the Yield of Corn. *Mon. Weather Rev.* 42: 78–87.
12. Thompson, L. M., 1969a: Weather and technology in the production of wheat in the United States. *Journal of Soil and Water Conservation.* 27: 149–156.
13. Thompson, L. M., 1969b: Weather and technology in the production of corn in the U.S. Cornbelt. *Agron. J.* 61: 453–456.
14. Thompson, L. M., 1970: Weather and technology in the production of soybeans in the central United States. *Agron. J.* 62: 232–236.
15. Thompson, L. M., 1986: Climatic change, weather variability and corn production. *Agron. J.* 78: 649–653.
16. Wallace, H. A., 1920: Mathematical Inquiry into the Effect of Weather on Corn Yield in the Eight Corn-Belt States. *Mon. Weather Rev.* 48: 439–446.

THE USE OF LONG-RANGE WEATHER FORECAST IN CROP YIELD MODELS

Ernest C. Kung

Department of Atmospheric Science
University of Missouri-Columbia
Columbia, Missouri 65211, U.S.A.

ABSTRACT

Although it has been more than 70 years since an initial attempt to use weather information in crop forecast, it is only during the past two decades that the multiple regression forecast has been used in practical operations. The feasibility and utilities of weather-crop models have been enhanced in recent years due to the advancement of large-memory computers, better meteorological observation networks, and demand by agricultural policy makers and the international commodity market.

The history of weather-crop model research in Taiwan is rather short, but documents clearly indicate that the available weather-crop models in Taiwan are of a high standard, and compose a good basis for future development. One particular advantage in Taiwan is the availability of long-term meteorological records on small scales, so that small-scale crop models can be developed on a county basis. The local weather conditions and crop environment are also adequately considered.

At present, the Central Weather Bureau is undertaking a special effort in developing the long-range forecast of Mei-Yu and typhoons. The replacement of meteorological variables during the crop seasons with long-range seasonal forecast will allow forecast time of one-season to one year. This will contribute significantly to planning and executing national policy and international trade. The recent experience of forecasting early summer heat waves and drought in the midwestern USA makes use of the long-range forecast in crop model especially hopeful.

Weather Forecasting Approach

1. Statistical and probabilistic model
teleconnections, regressions
2. Dynamic and physical model
processes: latent heating of condensation in cloud,
absorption and emission of radiation by CO_2 , O_3 , H_2O →
absorption and scattering of radiation by clouds as
aerosol
3. Chaotic
strange attractor