

作物環境反應之方法論

王仁煜講述²

蔣漢珊筆記³

Methods of Crop Response Studies

(Emphasis on Thermal Effects)¹

J. Y. Wang

Synopsis

Sorting devices, both single and multiple, a crop thermal response model and a hythergraph are used to illustrate temperature as a measure of crop environments. Emphasis is placed upon methodology. Methods of analysis and of synthesis are discussed.

The conclusion that the author has been made, shows the temperature in crop environment should consider the following items as guides to the researcher:

- (1) The thermal-field of a plant is conveniently represented by the observed temperature of the plant itself, the ambient air temperature and the ambient soil temperature in the root zone. In practice, plant-temperature is hard to measure. Therefore, the ambient air and soil temperature should be used.
- (2) In using ambient temperatures, "the change of temperature with time" (e.g., diurnal and interdiurnal temperatures), "the duration of temperature" (e.g., the frequency of temperatures above or below certain critical temperature levels) and "the temperature gradient", both horizontal and vertical, are far more important than the accumulation of temperature. If accumulated temperature has to be used, a short period of accumulation, such as 5-day or a certain phenological stage would be appropriate.
- (3) For the analyses of significant elements and significant periods, a series of sorting devices may be used. (See Figs. 1, 2, and 3).
- (4) In the determination of various levels of temperature on plants, the thermal response of a crop model can be useful. (See Fig. 4)
- (5) In the combination of temperature and other environmental factors, methods of synthesis can be employed. (See Figs. 5 and 6)

Finally in an ideal case, the heat budget of the thermal field should be accurately evaluated. The observation of the plant temperature should be taken and the phenological development of a crop measured. Improvement in both instrumentation and methodology will be necessary before these avenues of research can be pursued.

導 言

自從列氏創始列氏溫尺後，迄今二百餘年，溫度被認為植物生長與發育環境中之重要因素，實則，溫度之引用於植物環境反應之研究上遠較其他氣象因素為多⁽⁴⁾，因其較易測定與計算而並非較其他氣象因素更為重要。

研究溫度與環境之關係有二：(一)植物影響其環境溫度之分佈與變化；(二)環境溫度影響植物之生長與發育，二者互成因果，至為複雜，前者為植物氣候 (Plant climate) 之研究，乃小氣候 (Microclimate) 之分枝，後者為植物環境反應 (Crop response studies) 之研究，乃植物氣象之 (Phytometeorology) 之主科，本文着重於後者，而對於

前者僅略述之如次：

論及作物之熱域 (Thermal-field of crops)，熱 (Heat) 之空間與時間之分佈，包括潛熱 (Latent heat) 及感熱 (Sensitive heat) 須予重視，目前因吾人尚無法測定作物環境之熱分佈，故以溫度 (Temperature) 代表之，則氣溫、土溫、葉溫、莖溫、及根溫等之各高度之分佈均應加以觀測，溫度梯度之水平及垂直分佈以及日溫、夜溫並季節溫之變化率均應加以計算，如此則環境資料既多且繁，其處理方法應加研究，植物整個生長期之熱域必須有一完整之紀錄。因之，環境及植物發育期之空間與時間之類別必須闡明，始可加以比較。例如，研究作物根部發育，

1. 本文係美國氣象學會及美國作物學會聯合大會邀請講稿，該會於1961年12月27日在美聖路易城舉行。

2. 3. 美國威斯康辛大學氣象系教授、園藝系研究生。

4. Wang, J. Y. and G. L. Barger 1962, Bibliography of Agricultural Meteorology, University of Wisconsin Press, Madison Wisconsin. 673pp.

則土溫係有效因子 (Significant element)，而發芽期則為有效期 (Significant period)。

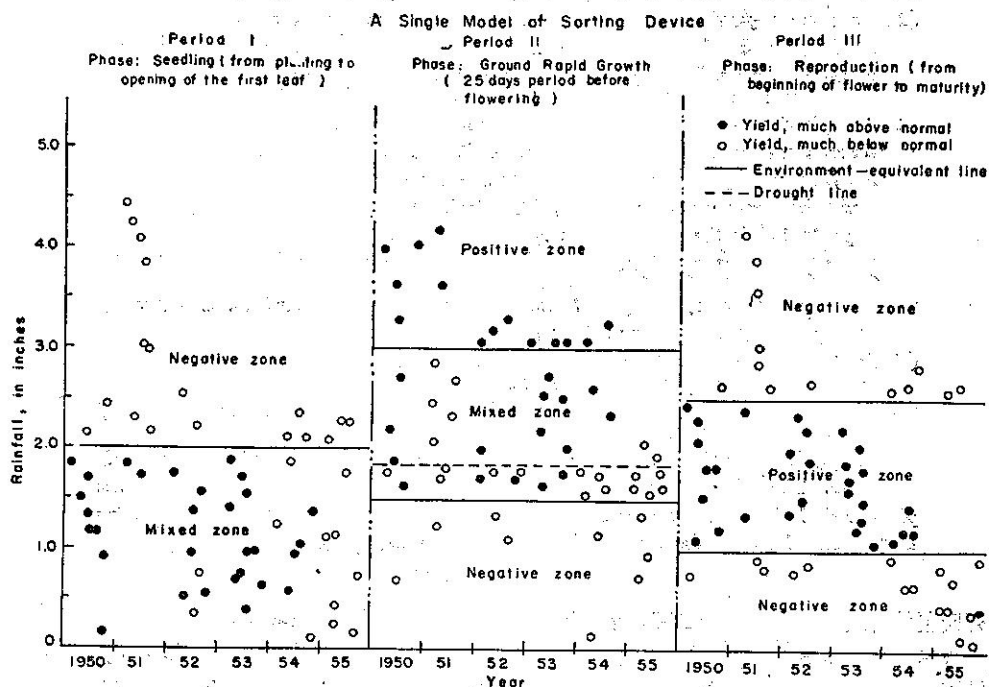
表示作物環境溫度之方法，不勝枚舉，有氣溫、土溫、葉溫，植物溫等。但由於微環境之差異極大。故僅部份之感熱可予表示，而潛熱則付之缺如，換言之，真實溫度 (True temperature) 尚難確定。由於植物本身感熱與潛熱之交替頻繁，又溫度與時間及空間之波動 (Fluctuation of temperature) 鉅大最理想之方法為植物反應與熱能之相關研究。但現有紀錄，仍付缺如。因之，此種方法在目前尚不能使用。換言之，僅有廣大區域性並多年之氣溫、降水、與日照時數等紀錄可以獲得而其他因素與植物反應關係較小，無需道及。

多年之植物與溫度相關研究限於一次及多次相關

係數之統計，換言之，此乃直線關係之分析，但作物反應為非直線式。同時，變數統計法，(Parametric statistics) 亦不能完全代表作物及其環境之關係，但非變數法 (Non-parametric statistics) 則可。非變數法之引用於農業氣象研究上者有二：(1) 分析法，(2) 綜合法。前者分析氣候為數個單元素 (Single element)，而後者則為連合各種不同單元素為一綜合體 (Combined unit)。本文着重於方法論 (Methodology)，並以作物之熱反應為示例。

分 析 法

分析圖解法 (Sorting devices) 為作物反應研究之指南 (見圖1、2及3)。因分析圖解法可以完成以下各任務以供應作物反應之研究。



(圖1)

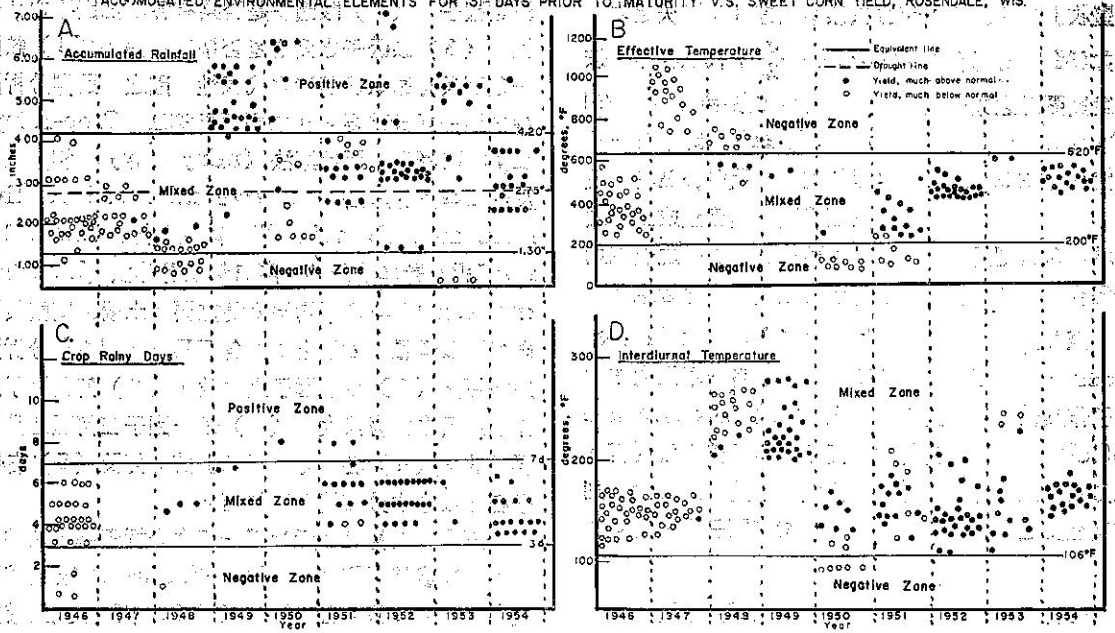
(一) 可決定主要因素之種類，例如某年某地水稻豐收，由分析圖解法可決定環境因素，何者為限制因子 (Limiting factor) 何者為阻碍因子 (Retarding factor)。如其他各環境因素俱適，而雨量不足或雨量過多而導致水稻歉收，則雨量不足稱為限制因子，而雨量過多則稱為阻碍因子。

(二) 可決定植物生長、發育各期中環境因子之個數及種類。

(三) 可個別確定環境因子之臨界值。

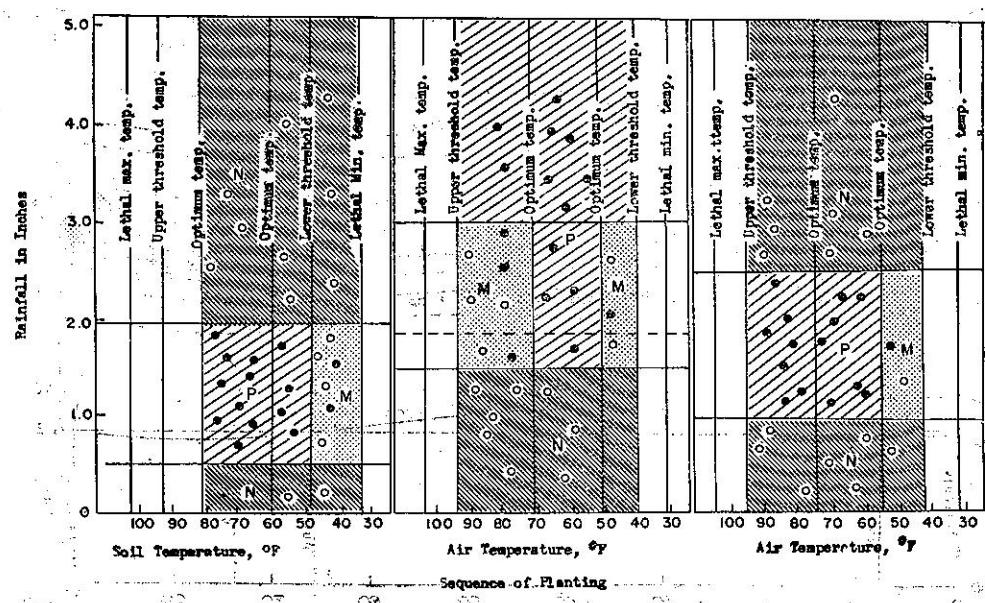
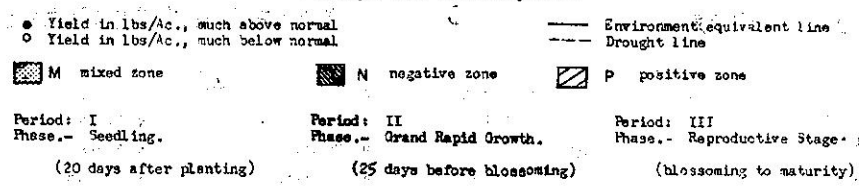
分析圖解法為非變數統計法，可分析作物在某期中對某環境因子之反應，作物反應可由產量之多寡，品質之優劣，植物之高低，開花期之遲早等等而決定之，而環境因子則可為雨量、溫度、相關濕度、蒸發等等，圖1為單類分析圖，(Model of the single sorter) 表明雨量及產量之關係，橫標 (Abscissa) 表示作物發育各期之年代，而縱標 (Ordinate) 則為每期之總雨量，黑點代表產量高于平均年 (Normal

ACCUMULATED ENVIRONMENTAL ELEMENTS FOR 31-DAYS PRIOR TO MATURITY V.S. SWEET CORN YIELD, ROSENDALE, WIS.



(圖 2)

A Multiple Model of Sorting Device



(圖 3)

year) M代表平均年。圈點代表產量低于平均年。

「豐收」及「歉收」年可以標準偏差(σ)決定之，例如 $(M + \frac{\sigma}{2})$ 代豐收年， $(M - \frac{\sigma}{2})$ 代歉收年，按照點與圈點之集合情形。吾人可畫出數種「等環境線」(Environmental equivalent lines)，圖中第一期之實線即 2.06 雨量線可以隔別負區及混合區者，是為「等環境線」之一種。正區為環境與產量成正變之領域，負區則為反變之領域，而正反變混合之領域則為混合區，故混合區應須再予測定其反應之因素。

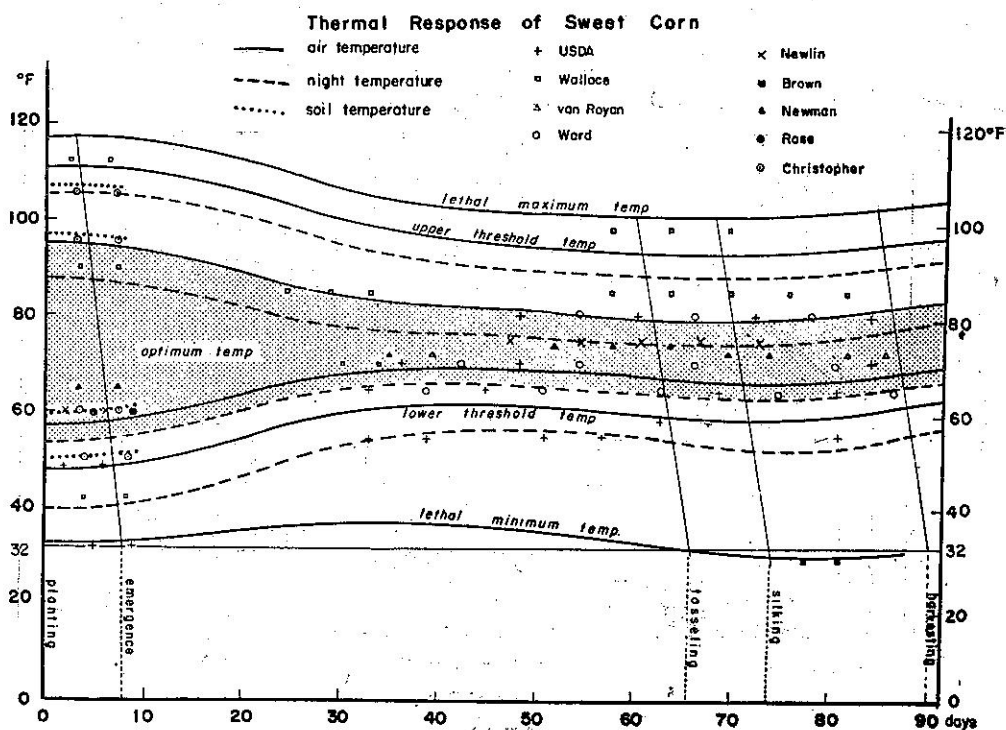
至如更改環境因子之次序 (Changes in the order of sorting) (即每種分析皆有一不同之環境因子作其縱標)，對各因子之有效性 (Significance of elements) 無何變化，而「等環境線」值則否。例如某區某一作物發芽期之限制因子為夜間溫度，則夜間溫度之重要性，決不受更改環境因子次序而變動。

分析次序依據各項因子反應值之遞降率而排列，反應值之遞降率者，乃先行引用反應最顯著之因子，而次要因子繼之，按此程序進行，則混合區之數值逐漸減少，終于完全消失。

選擇環境因子之條件列舉如後：

(1) 該因子是否為產量或其他作物反應之唯一決定因子，(2) 該因子是否具有各環境因素之代表性，(3) 該因子之測定是否準確可靠，(4) 該因子是否具有微氣候環境之代表性。因之，選擇分析圖解之因子極為重要。作物雨天計算法 (Crop-rainy day) 較優于雨天計算法 (rainy day)，相關最低及最高雨量計算法 (Relative min. and relative max. monthly rainfall) 較月雨量 (Monthly rainfall) 計算法為佳。隔日氣溫計算法 (Interdiurnal temp.) 較月平均溫度為重要，土壤濕度較優于雨量及蒸發量，如以上所述各項具備，則由單分析圖解法可知 (1) 環境因子之個數，(2) 何種因子對作物生長之影響較大，(3) 每一因子在何種時期最為顯著，(4) 各「等環境線」值為何及 (5) 各因子在每區中之分佈情形又如何。

圖 2 為包括數單元素為一組之分析圖解，該圖示威州，落參第 (Roseendale, Wisconsin) 玉蜀黍產量與氣候之關係。自 1946 至 1954 年該地玉蜀黍共有 276 次不同收穫期其九年之間平均產量為每畝 2.48 至 4.95 噸。至 276 次收穫期之平均產量則為 3.60 噸產量高于 4.00 噸者為高產量，而低于 3.00 噸者則為低產量。在 276 次中僅有 185 次可予分析，因有 91 次



(圖 4a)

屬于產量象數 (Mode)，產量象數在作物環境反應之研究上不關緊要。因多數產量屬于產量象數，係一種必然現象，吾人所感興趣者為產量過多與產量過少之問題而非產量象數。在成熟期前 31 天為有效期即臨界期，累積雨量則為此期中之主要因子，見圖 2A，顯然，高產量在累積雨量等於或大於 4.20 吋時，低產量在等於或低於 1.30 吋時，在此兩「等線」之中，可得 2.75 吋之乾旱線，(Drought line) 如此則有 78 % 低產量均在此乾旱線下。以上之等環境線可將此分析圖解分為三區；4.20 吋線之上面積為正區，1.30 吋線下之面積為負區，二者之間為混合區。混合區之紀錄應再加以分析，分析之標尺可為：(1) 氣溫，(2) 作物雨天，(3) 隔日氣溫。如應用氣溫為第二標尺時，則可使用有效氣溫為標尺，有效氣溫 (T_E 或 Effective temperature) 者為成熟期前 31 天之溫度頻率 (每日溫度低於 80°F 及高於 70°F 之次數) 圖 4 闡明玉蜀黍對溫度反應之概況，而圖

2B 表示溫度與玉蜀黍反應之實況。

第三分析圖解為引用作物雨天 (R_o) 為標尺之圖解 (見圖 2C)，其定義為：

(1) 非連續性作物雨天 (Isolated crop rainy day)：

(a) 當每日總降水量 (P_t) 等於或大於 0.20 吋時，則該日計為 1 R_o 。

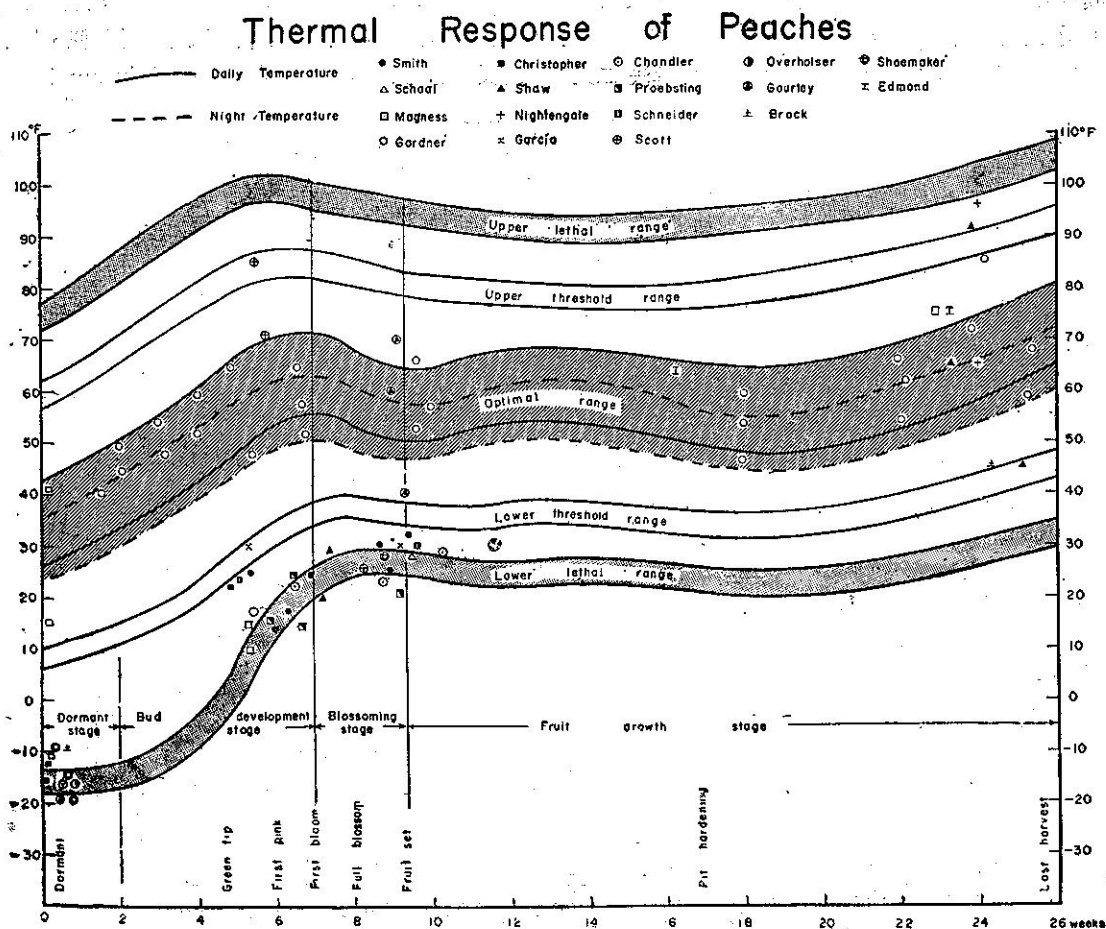
(b) 當 P_t 等於或大於 0.15 吋，但小於 0.20 吋時，且該日前無連續兩個晴天時，則計為 1 R_o ，否則，不予計算。

(c) 如 P_t 小於 0.15 吋時，則該日不予計算。

(2) 連續性作物雨天 (Continuous crop rainy days)：

(a) 當 P_t 等於或大於 0.10 吋時，則該日計為 1 R_o 。

(b) 當 P_t 等於或大於 0.05 吋，但小於 0.10 吋時，且前後兩日之總雨量大于 0.20 吋時 (前一日



(圖 4b)

總雨量大于次日總雨量) 則計為 $2R_0$ ，如前一日雨量小于次日雨量，則此兩日計為 $1R_0$ 。

(c) 當 P_t 小于 0.05 時，則該日不予計算。

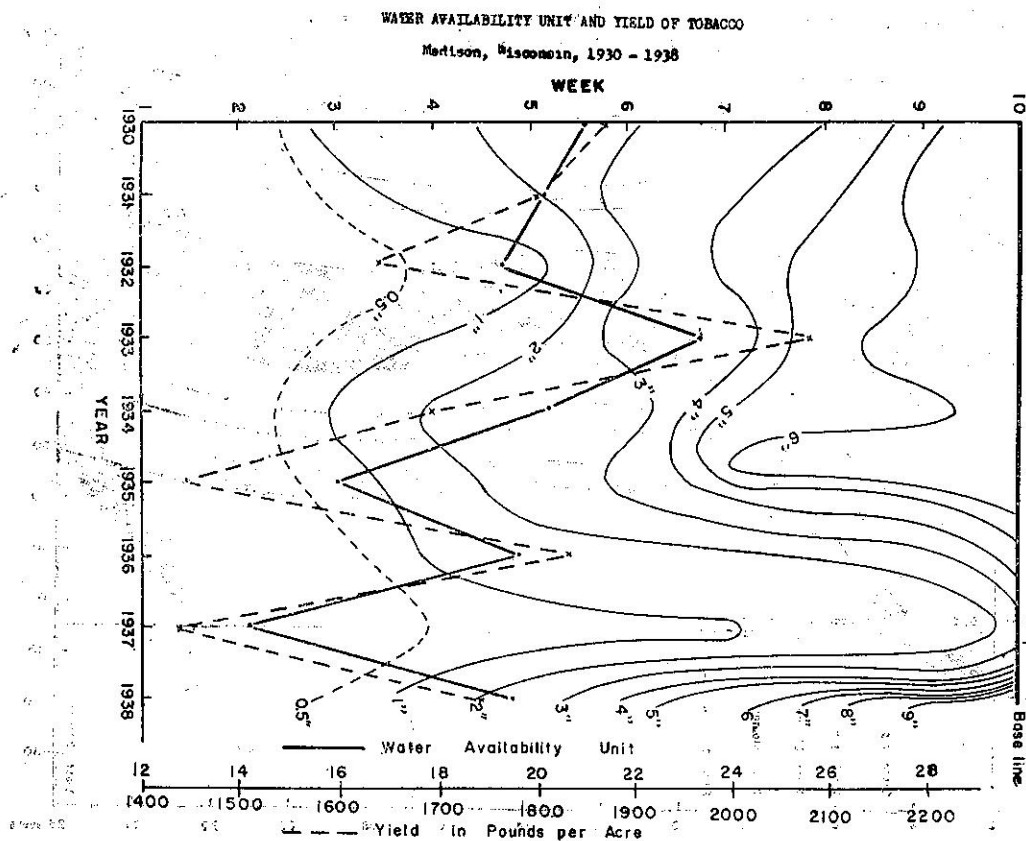
第四分析圖解為以隔日溫度為標尺之圖解，見圖 3D，其定義為前後兩日最高溫與最低溫之差，分析圖解法旨在解決各元素對作物反應之關係。實則，因環境及作物反應之測定尚未達理想境界，故圖解法不能表明其全部作用。

茲為表明分析圖解法發展之程序，將全部紀錄以隔日溫度標尺再予分析，在 182 次紀錄中，有 5 次紀錄在 106°F 溫度於當值 F (見圖 2D)，如以此同一標尺繼圖 2A 而进行分析，則有 8 次在 230°F 溫度當值上，此 8 次之紀錄原在圖 2D 中之混合區內。經雨量標尺分析後，結果部份之紀錄受雨量標尺所淘汰，而剩餘紀錄有 8 次為隔日溫度所控制者。總之，此證明標尺引用之先後足以影響分析之結果，但不能左右其重要性，在此例中雨量為最重要之因子，其重要性不受分析程序而變化。

複式分析圖解 (Multiple sorter) 為解決二元

素對作物生長與發育之反應。圖 3 為溫度與雨量對植物反應之模型，其關係至為明顯勿須贅述。事實上，兩種以上元素亦可稱為複式圖解，如為三次，則成為三度圖解，四次則為四度空間圖解。三次以上圖型複雜，不易辨識，此種圖解不合使用。總之，圖解法為分析法之初步，其相當值僅能代表一近似值。換言之，例如，圖 1 中第一期之 2 吋雨量相當值只能代表 1.5~2.5 吋之數值，而不能確定其數值確為 2 吋。

圖 4a 為各種不同溫度對玉蜀黍生長與發育之影響之模型。圖 4b 為溫度對桃樹生長之模型。以上模型可供研究者為五種不同反應界線。圖中上端界限為最高溫限線 (Lethal maximum temperture)，達此溫度作物永久停止生長，終于滅亡。繼之則為臨界溫線 (Upper threshold temperature)，達此溫度作物暫時停止生長。如溫度下降仍可恢復生長；再次為最適溫線 (Optimal temperature)，此溫度為生長發育之理想溫度。在最適溫線下為下臨界溫線 (Lower threshold temperature)，達此溫度，作物即暫停生長，其作用與上臨界溫線類似，最下端之反應線為最低溫限 (Lethal minimum tempe-



ature)。達此溫度則作物永久停止生長，其作用與最高溫限相似。

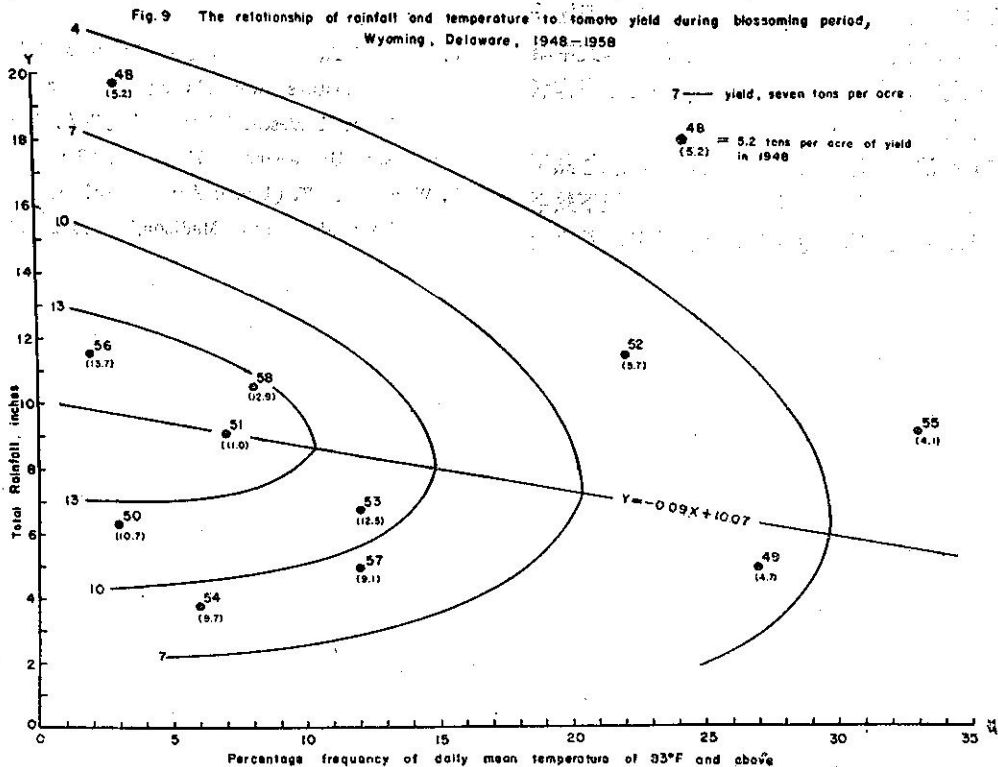
綜 合 法

綜合法為合併兩個或兩個以上不同環境因子之方法，研究綜合法時，應考慮以下三要點：(1)如何併合兩個或兩個以上單位不同之因子，(2)如何併合二不同之反應，(3)如何將併合因子(Combined units)成為一有系統之程序，以利研究，例如雨量係以公分或英寸表示之，而相關濕度之單位為百分數，併合此二不同單位因子，為綜合法應考慮之第一點，又如某地某種丸豆開花後雨量增加一時時，每畝平均產量增加 200 磅，而溫度增高 5 度時，則產量減少 50 磅二者反應關係不同。如何將之併合為綜合法應考慮之第二點、第三點則應考慮不同物候期 (Various phenological stages) 與不同環境因子 (Various environmental factors) 之關係，應如何列成各系統之程序。

關於第一點問題，可以煙草對濕度反應圖表合成法為示例。該法為綜合圖解法，圖 5 為各年「等相關最低雨量」(Isohyetals relative minimum

rainfall) 與產量之分析，顯然在曲線之波峯 (見 1937) 為產量最低年，而波谷 (見 1938 年) 為產量最高年，而峯谷交錯年，則為產量平均年 (見 1934 年)，併合相關最低雨量，作物雨日，及蒸氣壓淨值 (Vapor pressure deficit) 成為水效單位 (Water availability units)，該單位與產量之關係至大 (見圖 5 實線與虛線之關係) 至于水效單位之構成，則先由分析各單位因子圖解，然後再測量其基線與分析曲線之距離，此點可以證實如後，在圖 5 之 1932 年中 3 吋等雨量線與基線之距離為 2 吋，而在另一作物雨天圖解中亦可用同樣方法測其距離，以英寸表示之。如 5 日「等作物雨天線」與基線之距離為 3 吋則合併值為 5 吋。換言之原有單位前者為英寸，後者為雨日，經圖解後，二者均為英寸，故可相加，或相減，如植物反應為正變則相加，反變則相減，至于基線之位置，並無關係，因其相對值，而非絕對值，吾人所注意者，如基線之位置甚高，則所有之測量均大。其相對之關係仍然不變。

圖 6 為雨溫圖 (Hythergraph)，該圖表示溫度及雨量對番茄產量關係之研究。橫標為番茄開花時



(圖六)

溫度高出83°F之頻率，而縱標為同時期中之累積雨量，曲線為等產量線，在黑點上端為年號，例如48指1948年，而黑點下端指產量，例5.2指每畝番茄產量為5.2噸，顯然雨量達7吋至13吋時，而溫度高于88°F之天數在百分之十以內。最高產量約在18噸以上，反之如溫度甚高或雨量太低或太高則產量均低。

結 論

在作物熱區及作物熱反應之研究中，以下各點應詳加考慮，俾可拋磚引玉以求進步。

(一) 植物溫度為最理想之熱因子，遠較氣溫及土溫為優。但實際植溫變化太大，不易測定。故僅能使用氣溫及土溫兩因子。

(二) 溫度時間之變化(如週日與隔日變化)應予注意，溫度之空間變化則更重要。故其水平及垂直之梯度應予計算，如引用累積溫度法(Method of temperature accumulation)則以短期累積為宜，不可太長，五日為適當之天數，有時可以累積某物候期中之溫度亦甚適宜。

(三) 在分析有效因子(Significant element)及有效時期(Significant period)，一組連續之分析圖解法可以使用(見圖1、圖2及圖3)，俾達分析之目的，綜合法更屬重要。圖解綜合法在本文中略及，及其他綜合法如統計及數學法，讀者可參考作者之農業氣象課本。

(四) 須決定各不同溫度及不同物候期之熱反應，則圖4a及圖4b為示例，在理想情況下熱平衡(Heat balance)方法應予使用，因之凡與熱平衡

有關之因子，須要週知，則日光之強弱、土壤之乾燥、風力之大小，氣溫及土溫之高低，紅外線之夜間輻射之狀況等以及淨輻射(Net radiation)均應測定，然後方法論始臻完善(完)

參 考 文 獻

1. Azzi, C. (1956): *Agricultural ecology*. Constable and Co., London. 424 pp.
2. Glenday, A. C. (1955): The mathematical separation of plant and weather effects in field growth studies. *Australian J. of Agric. Research*. 6: 813~822.
3. Wang, J. Y. and R. A. Bryson. (1956): A study of phytometeorological effects on the growth and development of peas. *Department of Meteorology, University of Wisconsin*. 165 pp.
4. Wang, J. Y. (1958): An evaluation of some techniques in agrometeorology (Methods relating to problems in cultivated plants.) Ph. D. thesis, *University of Wisconsin, Madison, Wisconsin*. 172 pp.
5. Wang, J. Y. (1960): A critique of heat unit approach to plant response studies. *Ecology*. 41(4): 785~790.
6. Wang, J. Y. (1961): The phyto-climate of Wisconsin. 3. Moisture: Normals and hazards. Part A. Rainfall. *Research Report No. 7-A. Agr. Expt. Sta., University of Wisconsin*. 63 pp.
7. Wang, J. Y. (1962): *Agricultural meteorology*. Pacemaker Press Madison, Wisconsin. 500 pp.