

# 專 論

## 作物需水量與蒸發量相關之研究\*

### Studies of Crop Consumptive Use in Correlation with Evaporation

臺灣大學教授兼農工系主任

張 建 勛

#### 摘 要

1. 本研究之目的為尋求一簡易迅速而較可靠之方法，以供水利會工作站於灌溉期前估計作物需水量以為配水之根據。

2. 觀察以前溫室栽培旱作水稻之灌溉結果發現其累積作物需水量，與蒸發量間大致可成直線關係，而相關係數頗高（視圖(1)）

3. 循此構想進而整理過去數年間在嘉南學甲之灌溉試驗資料，研究他種作物之需水量與蒸發量或溫度間之關係。並繪出其直線關係，其相關係數亦頗高，其簡單之直線關係頗合實際應用。（視圖(2)表(1)，(2)，(3)）

4. 將來田間試驗資料更多，經整理後將可有更完整更正確之數據。

灌溉需水量為一切灌溉規劃最重要之基本資料，通常可依下式之關係估計：

灌溉需水量 = 田間需水量 + 輸水損失 - 有效雨量

但田間需水量乃包括作物本身之耗水量與田面與葉面之蒸發損失及田間之灌溉損失，而作物耗水量與蒸發損失則可合併稱為蒸發散量 (Evapo-Transpiration) 或稱為作物需水量 (Consumptive Use)。故就田間所需要之水量而言，亦可以下列關係式表示：

田間需水量 = 作物需水量 + 灌溉損失 - 有效雨量 - 地下水之供應

作物灌溉之有關研究中，以研究作物需水量之有關文獻最多。但由於作物需水量之影響因素至為複雜，各地氣候環境不同，土壤條件不同，作物種類與栽培習慣不同，耕作方法不同，加以研究作物需水量有不同之目的，有為灌溉規劃而研究，有為植物生理方面之研究，亦有為田間施灌而研究，其所用之方法不同，儀器不同，甚至作物需水量本身亦缺少一明確之定義，地區性非常明顯。故儘管此問題十分重要，世界各國積有數十年之研究試驗結果，但為臺灣灌溉規劃與田間施灌之應用上，仍難合乎需要。

臺灣過去六、七年間曾進行各項灌溉方面之研究，主要目的為提高水源與土地之有效利用。在農復會補助下，臺大農工系與嘉南水利會合作在臺南學甲鄉設立旱作灌溉試驗站。主要研究為嘉南地區之作物需水量及田間灌溉方法，近三年來更增加灌溉施肥之連應試驗，灌溉土壤之調查，地下水位之研究等項。數年累積之資料已可供若干項問題之初步研究分析。

如前所述作物需水量為灌溉規劃與田間施灌之主要根據，筆者於 54 年在長期科委會研究補助下以 Blaney & Criddle 公式整理田間觀測資料算出嘉南地區各種旱田作物之“k”值。Blaney & Criddle 公式為用氣象資料估算作物需水量方法之一，但過去用氣象因子之相關公式估算作物需水量多為用於規劃，此等公式擬直接用於田間施灌配水之估計則頗有困難，其理由如下：

以臺灣之嘉南平原為代表，此地區水源缺乏，多輪作田。過去對旱田作物不予灌溉，產量往往不理想。但曾文水庫之興建，旱田將可獲得灌溉，農業情形將有改觀。但臺灣農業之特點為集約栽培，一年多作，田塊小而作物栽培雜亂。水利會配水只能根據預定之計劃作定時定量之灌溉。例如某某時期灌溉一次，事先由工作站製發傳票通知農民於一定時間到場接受一定量之水，因此工作站須於計劃灌溉期前根據灌溉區內作物之種類，面積，施灌方法，土壤水分情形等資料，迅速估計需要水量而據以配水。為協助工作站完成此項必要任務，嘉南灌溉研究之最大目標，在尋求一項可於任何指定時間施灌前迅速決定每一田區需水量之估計方法。

作物需水量之估計方法可歸納為直接觀測與間接推算兩大類。直接觀測使用各種儀器設備，間接推算則利用有關因素成立公式關係以為推算。而此項推算公式多以氣象因子之相關為推算基礎。如 Blaney & Criddle, Thornthwaite, Penman, Olivier, 及 Day-Degree 等，陳尙於農工學報 13 卷 4 期會以上列各公式推算臺灣平原地區各種作物需水量加以比較

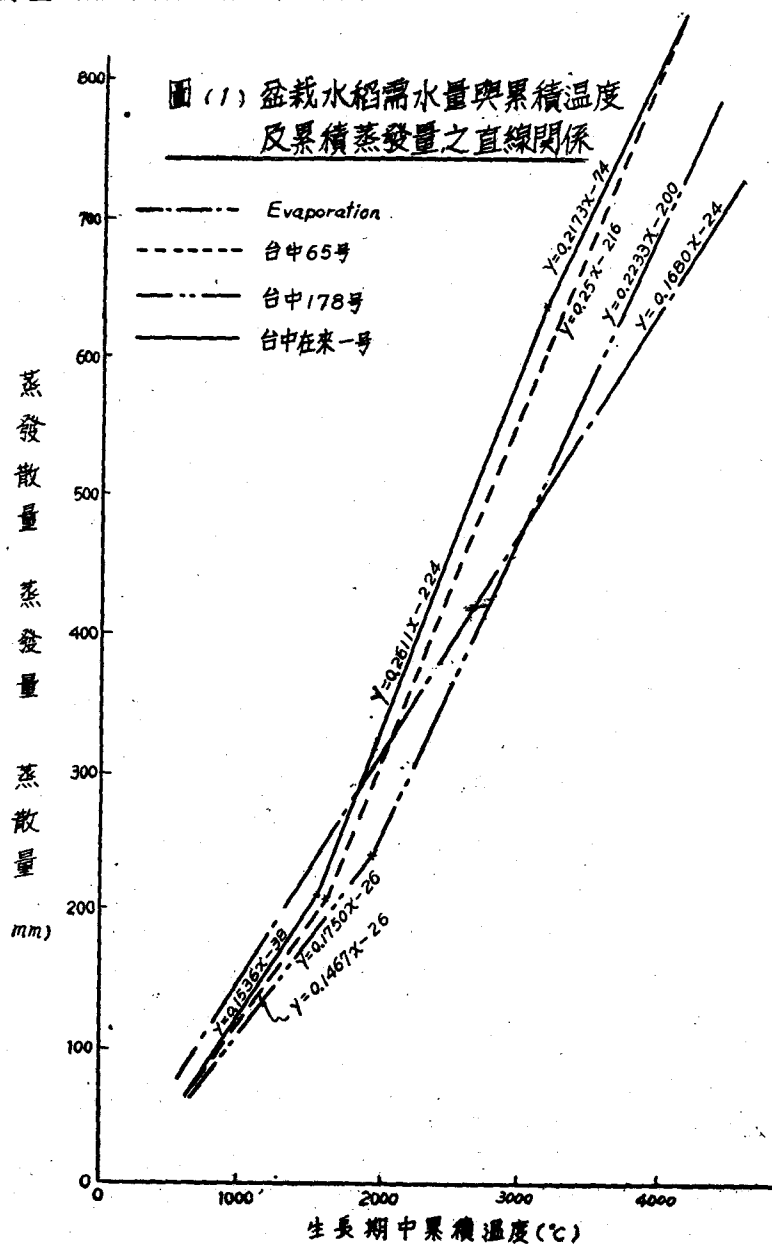
\* 本研究為國家長期發展科學委員會之補助

，其結果頗有差別。陳氏又指出各氣象因素中與作物需水量相關係數最大者，為綜合指標之蒸發量，玉井教授亦指出水面蒸發量為計算作物需水量最有效之依據。Veihmeyer 則指出用 Atmometer 之蒸發量計算作物需水量較用蒸發皿為佳。由此可見在氣象因素中以蒸發量為表示作物需水量似較使用其他因素受較少之限制。故筆者似就此作進一步之探討。

以過去之研究而言，用蒸發量推算作物需水量仍為一項全季節之比值，可用於灌溉規劃而未能直接用於灌溉期前決定配水量。又因水利會工作站未必有蒸

發量記錄但必有氣溫記錄，故研究作物需水量與蒸發量之相關同時亦試圖將作物需水量與溫度加以連繫。

筆者考慮作物生長期間，土壤水分之消長由於作物消耗而具有連續性。而灌溉期距為截取生長期之一段，土壤之保水能力作用於其中，用累積曲線當有平衡其局部差異之效果。故試以累積曲線繪出三個水稻品種；臺中 65 號，臺中 178 號，與臺中在來一號，在溫室旱作栽培下之狀態，視其累積作物需水量，蒸發量，與溫度間之關係如圖(1)並依圖中曲線導出下列公式：



### 1. 蒸發量與溫度間

全生育期

$$E = 0.1680T - 24$$

(E = 累積蒸發量, T = 累積溫度)

### 2. 作物需水量與溫度間

a. 臺中在來一號

初期 (累積溫度 0~1,600°C)

$$C = 0.1538T - 38 \quad (C = \text{累積作物需水量}, T = \text{累積溫度})$$

中期 (累積溫度 1,600~3,200°C)

$$C = 0.2611T - 224$$

末期 (累積溫度 3,200°C 以上)

$$C = 0.2173T - 74$$

b. 臺中65號

初期 (累積溫度 0~1,600°C)

$$C = 0.1467T - 26$$

中期 (累積溫度 1,600~3,200°C)

$$C = 0.2500T - 216$$

末期 (累積溫度 3,200°C 以上)

$$C = 0.2500T - 216$$

c. 臺中178號

初期 (累積溫度 0~2,000°C)

$$C = 0.1750T - 26$$

中期 (累積溫度 2,000~3,200°C)

$$C = 0.2233T - 200$$

末期 (累積溫度 3,200°C 以上)

$$C = 0.2233T - 200$$

以上關係式為直線方程式  $C = K_1T - K_2$  ( $K_1, K_2$  為常數, 故  $\Delta C = K_1T$  欲求一期間內作物需水量, 可由該期間內溫度累積數代入  $\Delta C = K_1T$  式中求得。例如臺中在來一號生育中期  $\Delta C = 0.2611T$  欲求五天之作物需水量, 以該五天之溫度累積 121°C 代入

$$\Delta C = 0.2611 \times 121 = 31.59 \text{ mm}$$

### 3. 作物需水量與蒸發量間

蒸發量與溫度間關係為  $E = K_1'T + K_2'$

$$\therefore T = \frac{E - K_2'}{K_1'} \text{ 代入}$$

$C = K_1T + K_2$  式中

$$\begin{aligned} C &= K_1 \frac{E - K_2'}{K_1'} + K_2 \\ &= \frac{K_1}{K_1'} \cdot E + \left( K_2 - \frac{K_1 K_2'}{K_1'} \right) \\ &= aE + b \quad (a, b \text{ 為常數}) \end{aligned}$$

知  $E = 0.1680T - 24$

$$C = 0.2611T - 224$$

$$\begin{aligned} \text{則 } C &= \frac{0.2611}{0.1680} E - \left( 224 + \frac{0.2611 \times 24}{0.1680} \right) \\ &= 1.554E + 251.3 \end{aligned}$$

$$\Delta C = a \Delta E$$

上述之直線公式如可成立, 對田間實施灌溉之估計用水量, 至為便利。設如在一灌區內, 作物之種類與栽培時期不一, 但灌溉系統之配水則有定期。工作站可以根據當地之蒸發記錄估計每一田區之需水量, 加以補給水路之損失, 及視整地情形與使用灌溉方法給予一合理之灌溉效率, 再作灌前土壤水分與有效雨量之校正, 即可計算給水門所需分配之流量與時間。

以上之關係表現於溫室盆栽旱作水稻。若此方法可行, 則以往之實驗資料, 可用為計算當地各種作物之常數“a”加以表列, 每次灌溉所需水量, 可根據兩次灌溉或某一期距間蒸發累積量乘以“a”, 即可求得。

過去數年來嘉南學甲試驗站會進行各種作物之灌溉試驗。供試作物包括甘藷、花生、玉米、大荳、黃蘗、高粱等。為求劃一, 只取試驗田區之觀測資料。此外溫室、滲透計、示範田及農民田區之灌測資料甚多, 但因栽培環境不同或資料不甚完整難以比較, 均不採用。有關觀測資料經彙集, 計算並整理列如下表:

表(1) (a) 玉米 51. 2. 27~51. 6. 5 (春作)

週數	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
週耗水量 (mm)	11.2	6.6	14.0	16.2	19.6	7.9	13.5	15.3	18.0	18.5	9.5	9.7	11.8
累計耗水量 (mm)	11.2	17.8	31.8	48.0	67.6	75.5	89.0	104.3	122.3	140.8	150.3	161.9	173.7
累計溫度 (°C)	149.5	312.5	426.5	558.5	733.0	878.5	1034.5	1212.0	1421.0	1635.0	1833.0	2047.0	2265.5
累計蒸發量 (mm)	29.40	59.52	77.80	110.4	140.5	164.7	186.9	217.6	249.0	284.2	323.7	357.2	398.1

(b) 花生 50. 8. 21~50. 12. 11 (秋作)

週 數	1~6 (土壤水分均在田間保 水量以上)		7	8	9	10	11	12	13	14	
週耗水量(mm)	未	觀	測	28.6	22.4	16.2	13.8	15.9	15.9	17.9	10.6
累計耗水量(mm)	—			28.6	51.0	67.2	81.0	96.9	112.8	130.7	141.3
累計溫度(°C)	—			153.5	348.5	515	677.5	838	1004.0	1147.5	1302.5
累計蒸發量(mm)	—			—	—	—	—	17.7	33.8	54.0	77.5

(c) 大荳 51. 7. 16~51. 10. 5 (夏作)

週 數	1	2	3	4	5	6	7	8	以下未觀測		
週耗水量(mm)	22.4	21.0	19.6	15.0	14.8	14.6	9.5	14.6	—		
累計耗水量(mm)	22.4	43.4	63.0	78.0	92.8	107.4	116.9	131.5	—		
累計溫度(°C)	217.5	433.5	658.5	868.0	1063.0	1271.5	1481.5	1685.5	—		
累計蒸發量(mm)	39.6	75.5	112.2	139.7	165.4	198.5	233.6	265.3	—		

(d) 黃蔴 52. 4. 8~52. 8. 16 (夏作)

週 數	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
週耗水量(mm)	14.0	11.2	7.3	8.4	14.3	20.2	12.1	4.0	15.7	23.0	14.0	5.0	45.4	36.4	27.4	27.4	13.4
累計耗水量(mm)	14.0	25.2	32.5	40.9	55.2	75.4	87.5	91.5	107.2	130.2	144.2	149.2	194.6	231.0	258.4	285.8	299.2
累計溫度(°C)	181	384.5	583.0	794	1010.5	1206.0	1428.5	1641.0	1838.5	2043.0	2256.5	2408	2674.5	2886.0	3075.5	3296.0	3495
累計蒸發量(mm)	54.0	91.47	179	222.7	275	326.2	380.3	423.4	461.5	498.5	531.4	567.5	602.9	642.5	663.7	697.5	734.6

(e) 甘藷 51. 10. 13~52. 3. 30 (裡作)

週 數	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
週耗水量(mm)	7.3	6.2	6.2	7.3	8.4	7.8	7.2	14.6	15.1	11.2	6.7	
累計耗水量(mm)	7.3	13.5	19.7	27.0	35.4	43.2	49.5	64.1	79.2	90.4	97.1	
累計溫度(°C)	169.5	332.5	480.5	632.5	804.5	940.0	1065.0	1204	134.9	1482.5	1593	
累計蒸發量(mm)	32.8	61.0	88.9	116.7	140.7	167.7	189.4	207.0	227.9	245.9	265.3	
週 數	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
週耗水量(mm)	3.4	3.4	13.7	14.3	6.2	8.0	5.0	8.4	5.0	9.5	2.8	—
累計耗水量(mm)	100.5	103.9	117.6	131.9	138.1	146.1	151.1	159.5	164.5	174.0	176.8	—
累計溫度(°C)	1676	1762	1860.5	1964	2066	2184	2300	2428.5	2580	2708.5	2845.5	—
累計蒸發量(mm)	290.3	313.7	342.3	368.3	389.9	405.2	442.2	474.5	502.2	525.9	552.7	—

(f) 甘藷 53. 8. 19~54. 2. 5 (裡作)

週 數	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
週耗水量(mm)	7.3	6.9	14.0	26.7	30.5	28.5	16.2	15.8	6.2	13.7	21.2
累計耗水量(mm)	7.3	14.2	28.2	54.9	85.4	113.9	130.1	145.9	152.1	165.8	187.0
累計溫度(°C)	211.5	419.5	627.5	840	1044.5	1234	1429.5	1619.5	1814	1995.5	2167
累計蒸發量(mm)	37.3	67.4	95.3	122.1	154.4	182.3	212.0	236.1	262.0	284.8	309.8

週 數	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
週耗水量(mm)	3.8	4.5	5.0	4.5	0	1.6	5.6	14.0	14.0	14.0	4.5	2.2
累計耗水量(mm)	190.8	195.3	200.3	204.8	204.8	206.4	212.0	226.0	240.0	254.0	258.5	260.7
累計溫度(°C)	2304.5	2463.5	2595.5	2724.5	2842.5	2978	3082	3201.5	3307.5	3393	3490	3597
累計蒸發量(mm)	331.7	364.2	391.5	419.6	443.4	468.7	491.9	562.0	580.6	602.9	622.7	645.4

(g) 甘藷 54. 9. 25~55. 2. 16 (裡作)

週 數	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
週耗水量(mm)	2.8	5.6	14.6	12.9	3.4	3.4	11.0	22.0	11.2	9.0
累計耗水量(mm)	2.8	8.4	23.0	35.9	39.3	42.7	53.7	75.7	86.9	95.9
累計溫度(°C)	196	303	569	737.5	918	1106.5	1220.5	1420.5	1590	1731
累計蒸發量(mm)	22.4	53.5	80.9	106.8	124.2	149.9	162.9	186.0	213.7	236.8

週 數	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
週耗水量(mm)	7.3	12.4	4.5	3.4	8.0	11.2	8.5	7.3	3.4	5.4
累計耗水量(mm)	103.2	115.6	120.1	123.5	131.5	142.7	151.2	158.5	161.9	167.3
累計溫度(°C)	1859.5	1979	2089	2198	2334	2462.5	2580.5	2721.5	2850.5	2986.5
累計蒸發量(mm)	258.8	275.7	296.6	316.4	334.0	358.1	382.5	404.8	432.3	460.9

(h) 高粱 55. 3. 11~55. 6. 12 (春作)

週 數	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
週耗水量(mm)	2.0	6.9	6.9	11.8	15.7	7.3	12.0	16.8	21.6	26.3	7.3
累計耗水量(mm)	2.0	8.9	15.8	27.6	43.3	50.6	62.6	79.4	101.0	127.3	134.6
累計溫度(°C)	150	264.5	420.5	593.0	769.0	766.5	1132.5	1323.5	1521.0	1698.0	1893.0
累計蒸發量(mm)	25.3	43.5	71.9	109.1	148.2	189.8	214.8	218.3	297.5	347.1	378.1

以上資料可分別以最小二乘方算出累計需水量與蒸發量，及累計需水量與溫度間之關係。其計算過程以玉米累計需水量與累計蒸發量之計算為例，如表(2)。

表(2)

N	X	X <sup>2</sup>	Y	Y <sup>2</sup>	X · Y	Y'	D=(Y-Y')	D <sup>2</sup>
1	29.40	864,3600	11.2	125.44	329.28	11.95	0.75	0.5630
2	59.52	3542,6304	17.8	316.84	1059.456	26.10	8.30	68.8900
3	77.80	6052,8400	31.9	1017.61	2481.820	34.70	2.80	7.8400
4	110.40	12188,1600	48.1	2313.61	5310.240	50.02	1.92	3.6864
5	140.54	19751,4916	67.7	4583.29	9514.558	64.18	3.52	12.3904
6	164.72	27132,6784	75.6	5715.36	12452.832	75.55	0.05	0.0025
7	186.88	34924,1344	89.1	7938.81	16651,008	85.96	3.03	9.8596
8	217.58	47341,0564	104.4	10899.36	22715,352	100.39	4.01	16.0801
9	248.98	61991,0404	122.4	14981.76	30475,152	115.15	7.25	52.5625
10	284.22	80781,0084	140.9	19852.81	40046,598	131.71	9.19	84.4561
11	323.66	104755,7956	150.4	22620.16	48678,464	150.25	0.15	0.0225
12	357.24	127620,4176	162.0	26244.00	57872,880	166.03	4.03	16.2409
13	398.08	158467,6864	173.8	30206.44	69186,304	185.23	11.43	130.6449
合計	2599.02	685,413,2996	1195.3	146,815.49	316,773,944			403,2366

$$\sigma = 5.57$$

$$(1) N \times \sum(X^2) - (\sum X)^2 = 13 \times 685,413,2996 - (2599.02)^2 = 2,155,467.9344$$

$$(2) N \times \sum(Y \times X) - \sum X \times \sum Y = 13 \times 316,773,944 - 2599.02 \times 1195.3 = 1,011,452.6660$$

$$(3) \sum(X^2) \times \sum Y - \sum X \times \sum XY = 685,413,2996 \times 1195.3 - 2599.02 \times 316,793,944 = -4,027,298.9230$$

$$(4) N \times \sum(Y^2) - (\sum Y)^2 = 13 \times 146,815.49 - (1195.3)^2 = 479,859.28$$

$$K = (2)/(1) = 0.47$$

$$a = (3)/(1) = 1.87$$

$$r = (2) / \sqrt{(1)(4)} = 0.994$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum D^2}{N}} = 5.57$$

以同上之計算求出各種作物之有關數值如表(3)

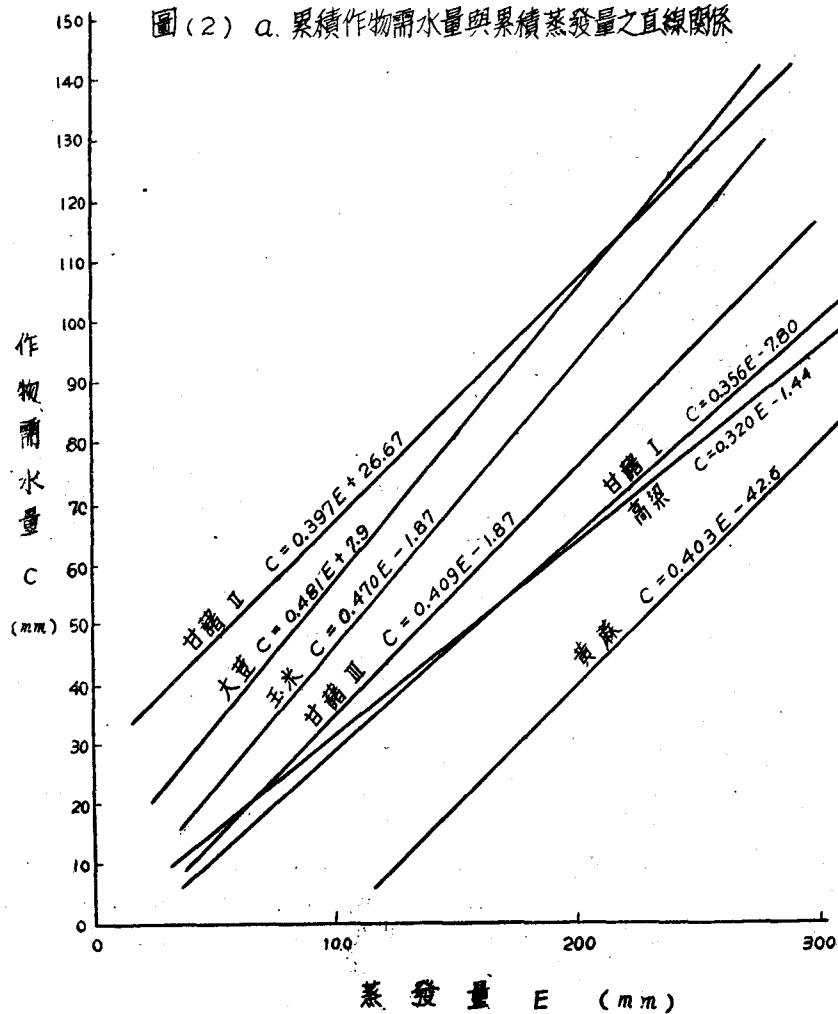
表(3) (a) 作物需水量與蒸發量

作物	栽培時期	K 值	a 值	γ	σ (S.D)
甘 藷	51. 10. 13~52. 4. 1	0.356	— 7.80	0.992	6.44
甘 藷	53. 8. 11~54. 2. 13	0.397	26.67	0.992	23.02
甘 藷	54. 9. 17~55. 2. 16	0.409	— 7.45	0.996	6.31
玉 米	51. 2. 27~51. 6. 5	0.470	— 1.87	0.994	5.57
黃 麻	52. 4. 8~52. 8. 16	0.403	— 42.6	0.942	—
高 粱	55. 3. 11~55. 6. 12	0.320	— 1.44	0.840	—
大 豆	51. 7. 16~51. 10. 5	0.481	7.9	0.994	5.02

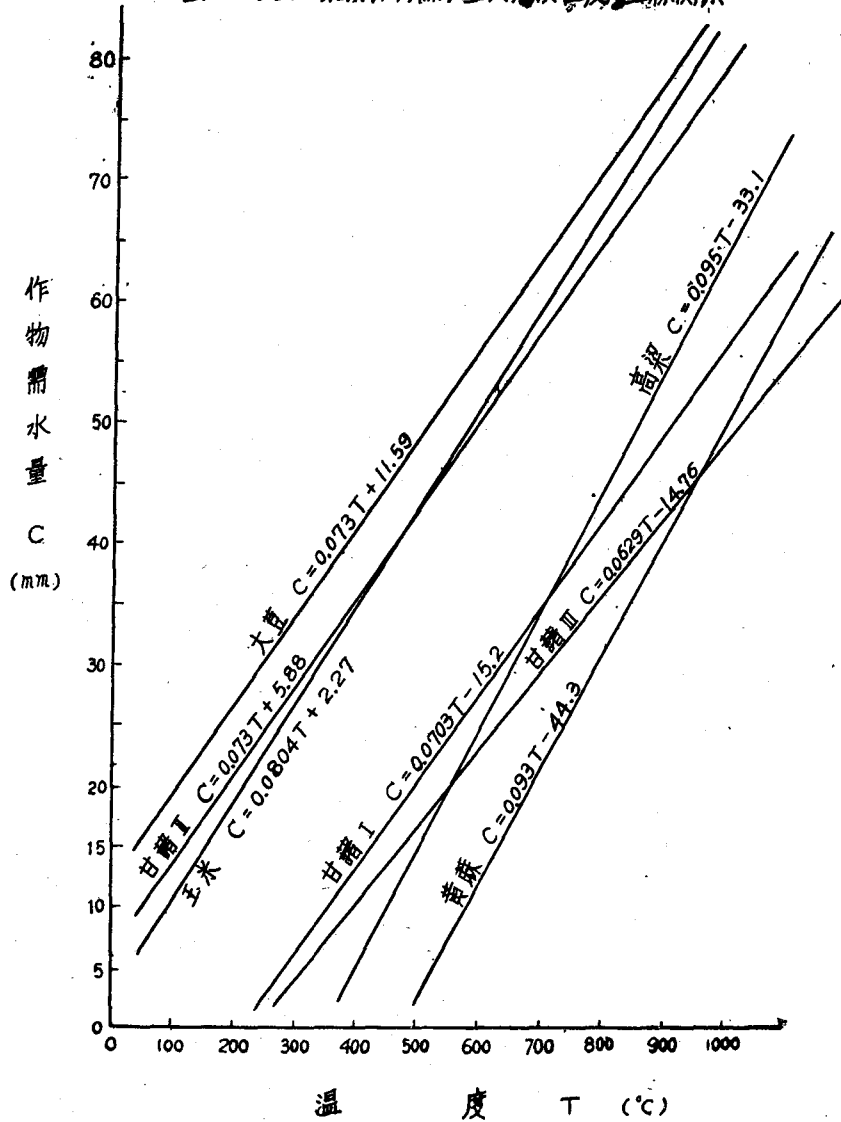
(b) 間作物需水量與溫度間

作物	栽培時期	K 值	a 值	$\gamma$	$\sigma$ (S.D.)
甘藷	51. 10. 13~52. 4. 1	0.0703	— 15.2	0.994	5.82
甘藷	53. 8. 11~54. 2. 13	0.0730	5.88	0.981	14.20
甘藷	54. 9. 17~55. 2. 16	0.0629	— 14.76	0.996	4.47
玉米	51. 2. 27~51. 6. 5	0.0804	2.29	0.994	5.75
黃麻	52. 4. 8~52. 8. 16	0.093	— 44.3	0.990	—
高粱	55. 3. 11~55. 6. 12	0.095	— 33.1	0.830	—
大豆	51. 7. 16~51. 10. 5	0.073	11.59	0.995	3.27

由於圖(1)所繪之水稻曲線點間分佈稍呈 S 形，故分三段繪出。但細究似無必要。實驗田每週觀測一次，且由於其中有因降雨或霜害，影響觀測，點數無多。加以灌溉皆在中期，權重較大，似可視作直線分析。用上列之 K, a 值，繪出如圖(2)



圖(2).b. 果糖作物需水量與累積溫度之直線關係



### 討 論；

1. 由圖(2)可見各種作物之耗水量不但作物間有相當差異，同樣作物不同品種與不同栽培期亦有差別，可見於三作甘蔗之比較。當然作物需水量與其生長狀態有密切關係，由此可知作物需水量之估計不能隨意引用書本資料，自須根據當地之觀測結果加以合理之判斷，較為可靠。
2. 臺灣氣候與農業環境特殊，同樣作物可在不同季節栽培。作物需水量本為各項影響因素之綜合數值。

其中土壤與地下水位條件為地區性之因素，故就一特定地區而言，外界影響因素主要為氣象。而氣象因素中以用比較能代表綜合影響之蒸發量較為便利。

3. 圖(2)之直線可見累計蒸發量或累計溫度與作物需水量之相關係數均頗高，利用直線之關係式計算任何一段時間之作物耗水量均至為簡便。若資料較為充實可將各種作物不同季節之“a”值列出，工作站可於灌溉期前極短時間內算出每一田區之需水量。