

主要果蔬預冷設備之研製和應用 (II)— 青蔥呼吸熱之測定及應用

Design and Application of Precooling Systems for Major Fruits and Vegetables (II)—Measurement and Application of the Respiration Heat of Green Onion

前國立臺灣大學農工研究所研究生

國立臺灣大學農機系教授兼主任

郭 景 儀

蕭 介 宗

Ching-yee Kuo

Jai-tsung Shaw

摘 要

青蔥呼吸熱約佔預冷負荷的 0.9~2.2%；而佔青蔥田間熱的 1~3.1%。因此，呼吸熱佔預冷負荷之比例不大。在 5°C 時臺灣青蔥初期呼吸熱為 4,267 仟卡/日·噸。在 20°C 時初期呼吸熱為 13,443 仟卡/日·噸。

Abstract

The respiration heat of green onion is about 0.9~2.2% of total precooling load or 1~3.1% of its field heat. Therefore, the ratio of respiration heat to total refrigeration load of precooling system is very small. The initial respiration heat of Taiwan green onion is 4,267 kcal per day per ton at 5°C and 13,443 kcal per day per ton at 20°C.

前 言

蔬菜預冷的預冷負荷大致上來自於蔬菜的田間熱；蔬菜的呼吸熱與其他熱源（如紙箱熱等）。在預冷系統之預冷負荷如能合理的預估，應可減少投資，提高能源使用效率，降低其使用成本。目前，臺灣蔬菜呼吸熱之資料多未見諸文獻，若引用國外文獻資料，可能會有很大之差異。因為蔬菜的呼吸熱受到品種、生長環境和採收時的條件有關，透過本研究可達成下列目的：

1. 建立一套量測蔬菜呼吸熱的方法。
2. 估算呼吸熱對預冷負荷所佔之比例，做為設計預冷系統之參考。

文 獻 探 討

新鮮的蔬菜、水果採收後，仍然是活的組織，繼續呼吸產生二氧化碳、水和熱量，可用下式表示：



呼吸時每產生 264 公克的二氧化碳（6 克分子）即放出 673 仟卡的熱量；或每一公克的二氧化碳放出 2.55 仟卡的熱量。將公克變為公絲（mg）則每公絲二氧化碳放出 2.55 卡的熱。因此，測定每小時每公斤蔬菜產生多少公絲的二氧化碳，乘上 61.2，可推算每日每噸蔬菜產生多少仟卡的呼吸熱，其單位換算過程如下：

表一、在不同溫度下各種蔬菜呼吸時產生的熱量。無括號之數字為最初產生的熱量；括號內之數字為近似均衡產生的熱量。（熱量單位：每日每噸仟卡；王，1981）

蔬 菜 種 類	溫 度 (°C)					
	0	4.4	10	15.6	21.1	26.7
朝鮮薊（球形）	2,750 (1,390)	3,670 (1,940)	6,000 (3,330)	8,860 (4,720)	14,250 (8,330)	
蘆 筍	4,890 (1,670)	8,330 (3330)	1,860 (5,560)	20,000 (9,720)	30,560 (16,670)	
四 季 豆	1,220 (1,390)	2,140 (2,080)	3,560 (3,330)	5,690 (5,190)	7,940 (7,220)	
紅 根 甜 菜	440 (330)	580 (560)	830 (720)	1,420 (1,030)		
青 菜 花		2,110 4,440 (2,500)	4,940	10,610 17,830 (11,110)	18,280	
孢 子 甘 藍	1,470 (940)	2,970 (1,970)	5,170 (3,860)	6,530 (5,830)		
甘 藍		670	1,110	1,390	2,640	3,420
春 甘 藍	830 (580)	1,310 (1,080)	2,030 (1,780)	3,500 (3,280)		
冬 甘 藍		1,250 (830)	2,080 (1,470)			
胡 蘿 蔔		1,190	1,920	2,420	4,310	
花 椰 菜		1,250	2,060	2,810	4,890	
	1,470 (470)	1,670 (1,190)	2,970 (2,500)	5,000 (4,110)		
芹 菜	440	670		2,280	3,940	
	440 (306)	780 (560)	1,670 (1,190)			
胡 瓜				2,030 (1,470)	2,940 (1,940)	
大 蒜	180 (670)	360 (1,580)	560 (1,940)	670 (1,670)	610 (1,110)	
辣 根	(500)	(860)	(1,610)	(2,000)	(2,720)	
球 莖 甘 藍	(610)	(1,000)	(1,920)	(3,000)		

表 一 (續)

表一、在不同溫度下各種蔬菜呼吸時產生的熱量。無括號之數字爲最初產生的熱量；括號內之數字爲近似均衡產生的熱量。(熱量單位：每日每噸仟卡)

蔬 菜 種 類	溫 度 (°C)					
	0	4.4	10	15.6	21.1	26.7
韭 葱	1,000 (580)	1,780 (1,190)	4,170 (3,280)	7,140 (5,060)		
結球萵苣	1,030 (560)	1,220 (810)	2,440 (1,670)	2,500 (2,360)	3,670	
		810	1,330	2,190	3,470	5,030
不結球萵苣		1,780	2,390	3,830	6,140	8,940
	1,080 (670)	1,610 (780)	2,970 (1,470)	4,110 (2,440)		
立生萵苣		1,250	2,170	2,720	4,190	6,610
洋 菇	2,670 (1,500)	4,330 (5,528)	(9,030)	(14,060)	19,330	
洋 香 瓜						
大 香 瓜		560	944	2,190	2,940	4,080
蜜露香瓜		470	830	1,440	1,860	2,000
		250		(810)		
黃 秋 葵			5,530	8,920	15,940	21,080
乾 洋 葱		210	440	670	1,030	1,720
青 葱	1,170 (1,000)	1,720 (1,530)	3,170 (2,860)	5,440 (4,940)	7,690 (6,810)	10,690 (7,440)
防 風	940 (530)	1,060 (720)	1,610 (1,250)	2,610 (1,970)		
不去莢豌豆	2,360				18,060	
	2,250 (1,780)		7,140 (4,170)			
去莢豌豆	4,610				24,170	
甜 椒		610	890	1,390	2,670	
未熟馬鈴薯		720 (720)	1,280 (860)	1,890 (860)	2,750 (1,110)	
成熟馬鈴薯		360 (420)	610 (420)	720 (420)	970 (420)	

表 一 (續)

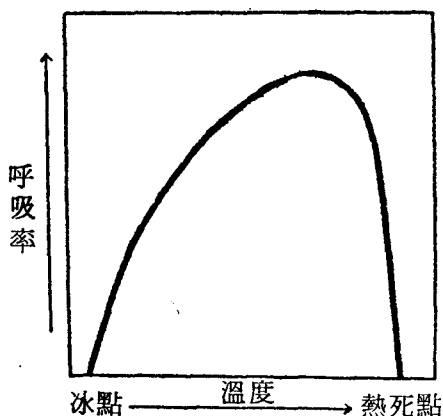
表一、在不同溫度下各種蔬菜呼吸時產生的熱量。無括號之數字為最初產生的熱量；括號內之數字為近似均衡產生的熱量。(熱量單位：每日每噸仟卡)

蔬 菜 種 類	溫 度 (°C)					
	0	4.4	10	15.6	21.1	26.7
很熟馬鈴薯		310 (420)	420 (420)	610 (420)	720 (560)	
不帶葉蘿蔔	580	810		2,580	3,530	5,420
帶葉蘿蔔	1,060	1,280		4,750	8,330	11,780
食用大黃(葉柄)	640	890	1,500	2,420	2,940	
菠 菜		2,810	6,750	10,920	14,060	
夏 菠 菜	1,310 (720)	1,970 (1,670)	4,580 (3,560)			
冬 菠 菜	1,560 (1,080)	3,560 (2,080)	6,310 (4,170)			
夏 南 瓜	780	1,140		5,560	5,940	
甜玉米(帶苞葉)		4,750	6,830	9,940	17,610	24,860
甘藷(傷癒處理)			(860)	(1,390)		
甘藷(未傷癒處理)				1,750		4,470
綠熟蕃茄		430	920	1,250	2,110	2,610
成熟蕃茄			860	1,640	2,470	2,940
蕪菁(根)	360 (240)	890 (420)	1,190 (780)	1,360 940	1,940	
蕪菁(葉)	1,720 (1,110)		4,170			
		(3,610)			(8,500)	(16,250)
豆 瓣 菜	1,610 (1,190)	2,970 (2,670)	5,640 (5,060)	12,470 (10,110)		
西 瓜		220	460		1,310	

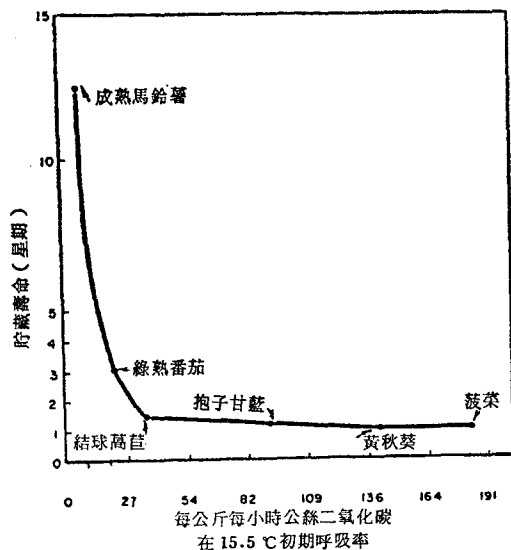
$$\frac{2.55\text{cal}}{\text{mg CO}_2} \times \frac{\text{mg CO}_2}{\text{kg} \cdot \text{h}} \times \frac{1000\text{kg}}{\text{噸}} \times \frac{24\text{h}}{\text{日}} \times \frac{\text{kcal}}{1000\text{cal}} \rightarrow \text{kcal/日} \cdot \text{噸}$$

$$\therefore \frac{\text{mg CO}_2}{\text{kg} \cdot \text{h}} \times 61.2 = \frac{\text{kcal}}{\text{日} \cdot \text{噸}}$$

根據 Ryall 和 Lipton (1978) 或王 (1981)，當蔬菜的溫度自冰點上升至熱得使它受傷為止的溫度，其呼吸率通常隨溫度之上升而增加。到某一高溫以後呼吸率即開始下降，直至熱死點呼吸即停止（如圖一）。



圖一、蔬菜自冰點至熱死點 (thermal death point)，其呼吸率隨溫度之變化而變化 (王, 1981)。



圖二、六種蔬菜貯藏於15.5°C時其 初期呼吸率與貯藏壽命之關係 (王, 1981)

蔬菜預冷及早期貯藏受到初期呼吸率之影響甚大。不同蔬菜在同一溫度下其初期呼吸變異很大，在 21°C 下之初期呼吸率範圍從馬鈴薯的二氧化碳 10mg/h·kg 至青花菜的 300mg/h·kg。根據王 (1981)，表一是不同蔬菜在不同溫度下各種蔬菜的呼吸熱。

根據 Ryall 和 Lipton (1978) 或王 (1981)，呼吸率是蔬菜貯藏壽命很好的指標。如圖二，高呼吸率貯藏壽命短，低呼吸率貯藏壽命長。

實驗設備與方法

本實驗在利用臺大園藝系現有的實驗設備來測定呼吸熱，過程是開放連續式的，較關閉蓄積式接近自然的呼吸狀態，而且可以進行追蹤呼吸率變化之全貌。在實驗測定過程中控制適當而穩定的空氣流量，以免空氣流量的高低而影響測定蔬菜之呼吸率。因此，在作實驗期間對空氣流量，必經常校正。

此實驗設備主要包括下列幾項：

- (1) Carle 公司出品的液態—氣態—色層分析儀 (Gas-Liquid Chromatography)，在不銹鋼管柱內裝活性氧化鋁，溫度 60°C 火焰離子化檢器 (Flame Ionization Detector)。
- (2) 肥皂泡流量計：用來校正空氣流量，以達控制適當而穩定的空氣流量之目的。

實驗用之青蔥來自臺北忠孝大橋下中洲農場之成熟無病害、無損傷及大小均一的青蔥。採收後青蔥分兩批處理，5°C 之青蔥樣品裝入保溫箱，其內部有一層海棉層於碎冰上；另一批 20°C 之青蔥樣品則裝入大塑膠袋內，並小心避免折傷。立即運送至實驗室，去除青蔥不良的葉片為防止葉片腐爛，不清洗青蔥葉片，僅將根部泥土用水洗淨。

參考 ASHARE (1982)，青蔥在貯藏條件為 0°C 溫度與相對濕度 95% 時，可儲存 3~4 星期。所以，實驗溫度設定在 5°C 時應不會有寒害產生。另一組實驗溫度設定在 20°C 下，兩種試驗結果可

來用比較呼吸率隨貯藏或收穫溫度變化之情形。實驗步驟如下：

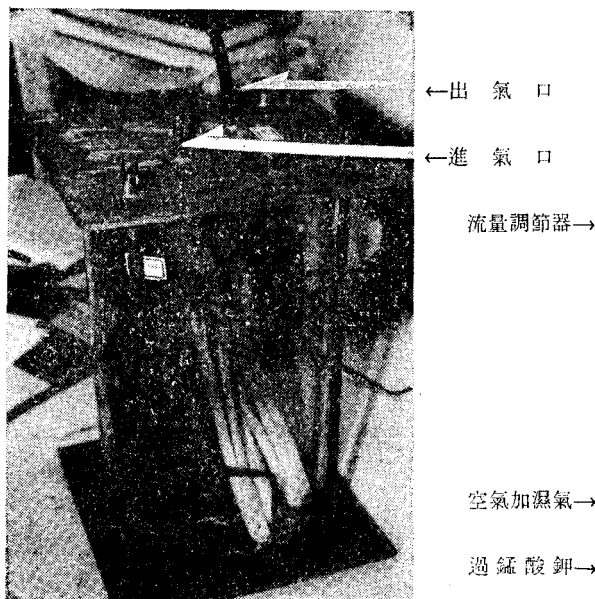
- (1) 將5°C與20°C的青蔥樣品稱重後，裝入9公升乾淨之呼吸缸，再密封呼吸缸，呼吸缸蓋上留一進氣口，另一為出氣口。如圖三，分別放入5°C與20°C的恒溫室中，使青蔥溫度到達5°C或20°C後，再測其呼吸率。
- (2) 由壓縮機將空氣壓入恒溫室中，經過鹼性過錳酸鉀 (Alkaline Potassium Permanganate) 以除去空氣中的乙烯，再使氣體通過水層以加濕空氣，最後經過流量控制器，(裝置如 Claypool 等, 1942 所述)。本實驗所用之空氣流量在5°C時之實驗為每小時2.4公升，而20°C時則為每小時6公升，由圖四呼吸缸底部流入，迫使呼吸作用產生的二氧化碳由槽頂之出

氣口流出。

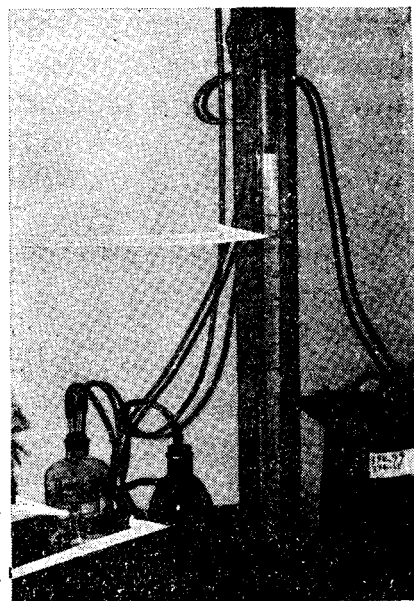
- (3) 以不漏氣的注射器 (Gas-tight Syringe)，從呼吸缸的出氣口處抽取10cc的氣體注入色層分析儀之注射通口，再由氣相層析質譜分析儀記錄其刻度，與已知濃度之二氧化碳的刻度相比較，即可測得青蔥的呼吸率。
- (4) 肥皂泡流量計應附在呼吸缸之出口處，將肥皂液倒入充滿橡皮球之流量計，並達測管處加入足量之皂液使壓縮橡皮球時皂液會達側管。因此，當氣體流過時壓下橡皮液，而產生肥皂泡，再由氣體攜帶至刻度管上。

測量空氣流量時，使用馬錶來測出肥皂泡經過刻度管上10ml 所花費的時間。則每分鐘多少 ml 之流量可藉用下列公式表之 (許, 1984)：

$$\text{流量 (ml/h)} = 3600 \times 10 / \text{秒數}$$



圖三、青蔥放入呼吸缸之情形



圖四、處理空氣置裝

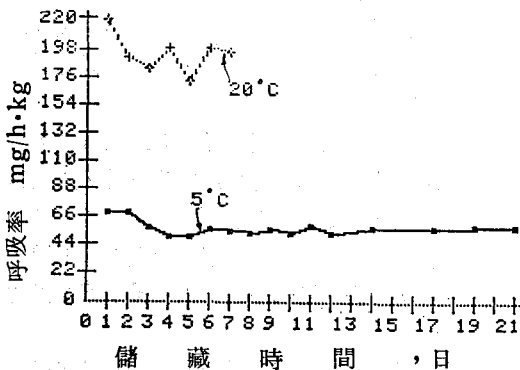
結果與討論

圖五為青蔥分別於5°C與20°C儲藏溫度下的呼吸率趨向圖，在20°C下青蔥的初期呼吸率為219.3mg/h·kg; 5°C下青蔥的初期呼吸率為69.6mg/h·kg，相差為3.2倍。在20°C下青蔥的平均呼吸率為194.2mg/h·kg，而5°C下青蔥的平均呼吸率為57.3mg/h·kg，相差3.4倍。於20°C儲藏溫度下的青蔥經過7天後，葉部有些呈淡黃色且有腐爛的現象；而在5°C下的青蔥存放21天之後，葉色仍為翠綠色，但有些葉尖有軟化現象。

青蔥儲存在不同的溫度下，其呼吸率有極大的差異。儲存溫度愈高，則有較高的呼吸率，相對的儲藏貯藏壽命減短；而貯藏在低溫時其呼吸率低，

吸率為57.3mg/h·kg，相差3.4倍。於20°C儲藏溫度下的青蔥經過7天後，葉部有些呈淡黃色且有腐爛的現象；而在5°C下的青蔥存放21天之後，葉色仍為翠綠色，但有些葉尖有軟化現象。

相對的貯藏壽命較長。所以若要延長蔬菜的貯藏壽命必須考慮減緩其呼吸率，預冷是有效降低呼吸率的方法。



圖五、新鮮青蔥在5°C與20°C下之呼吸率隨儲藏期變化之情形

在預估真空預冷系統負荷時，蔬菜的初期呼吸熱是必須要考慮的。現以，預冷青蔥來預估本系之真空預冷系統的預冷負荷。在30分鐘內，將20公斤的青蔥由 30°C 真空預冷至 0°C 時之田間熱 (Q_f) 真空預冷負荷可依據 Wang 和 Gitlin, (1964) 所用之公式：

$$Q_f = V \times C \times (T_1 - T_2) \times (2/3) \times 60 / (1/2 \text{ 實驗冷卻時間 (分)})$$

Q_f ：產品的田間熱真空預冷負荷，kcal/h

T_1 ：產品初溫，°C

T_2 ：產品終溫，°C

C ：青蔥比熱，大約為 0.93 kcal/kg·°C (ASHRAE (1985))

V ：每次預冷之蔬菜量，kg

$$Q_f = 20 \times 0.93 \times (30 - 0) \times (2/3) \times 60 / (1/2 \times 20) = 2,232 \text{ kcal/h}$$

(2) 青蔥的呼吸熱： (Q_R)

由圖五知青蔥在 20°C 下的初期呼吸率為 219.3 mg/h·kg。根據 Ryall 和 Lipton (1978)，引用 Van't Hoff 所研究結果溫度每增加 10°C，其化學作用之速率幾乎增加 1 倍。因此青蔥在 30°C 時呼吸率為 438.6 mg/h·kg，其呼吸熱為

$$\begin{aligned} Q_R &= 20 \text{ kg} \times 483.6 \text{ mg/h} \\ &\quad \cdot \text{kg} \times 2.55 \text{ cal/CO}_2 \cdot \text{mg} \\ &= 22,368 \text{ cal/h} \div 23 \text{ kcal/h} \end{aligned}$$

(3) 冷卻真空冷卻室內壁、紙箱的熱 (Q_w)，

預估為

$$Q_w = 300 \text{ kcal/h}$$

$$\therefore \text{預冷負荷} = Q_f + Q_R + Q_w = 2,232 + 23 + 300 = 2,655 \text{ kcal/h} \quad \text{比較}$$

呼吸熱／田間熱真空預冷負荷

$$= \frac{23 \text{ kcal/h}}{2,232 \text{ kcal/h}} \times 100\% = 1\%$$

呼吸熱／真空預冷負荷

$$= \frac{23 \text{ kcal/h}}{2,655 \text{ kcal/h}} \times 100\% = 0.9\%$$

如在 45 分鐘內，將 20 公斤的青蔥由 30°C 以風冷預冷至 0°C 時。

(1) 風冷預冷田間熱 $Q_f = V \times C \times (T_1 - T_2) / t$

$$Q_f = 20 \times 0.93 \times (30 - 0) / (45/60) = 744 \text{ kcal/h}$$

Q_f ：產品的田間熱 kcal/h

T_1 ：產品初溫，°C

T_2 ：產品終溫，°C

C ：青蔥比熱，0.93 kcal/kg·°C

V ：每次預冷之蔬菜量 (kg)

t ：預冷時間 (h)

(2) 青蔥的呼吸熱 (Q_R)

$$Q_R = 23 \text{ kcal/h}$$

(3) 冷卻紙箱的熱 (Q_w) 預估

$$Q_w = 300 \text{ kcal/h}$$

$$\therefore \text{風冷預冷負荷} = 744 + 23 + 300 = 1,067 \text{ kcal/h}$$

比較

$$\text{呼吸熱／風冷預冷田間熱} = 23/744 \times 100\% = 3.1\%$$

$$\text{呼吸熱／風冷預冷負荷} = 23/1,067 \times 100\% = 2.2\%$$

由以上計算得知，呼吸熱佔田間熱的 1%~3%。或佔預冷負荷之 1~2%。Wang 和 Gitlin (1964)，真空預冷萵苣 (Lettuce) 由 24°C 至 1°C 時估算萵苣之呼吸熱佔田間熱的 3%。因此，在預估蔬菜呼吸熱時，可以以田間熱之 3% 或預冷負荷之 2% 來考慮。

由表一中查得 4.4°C 下青蔥之初期呼吸熱 1,720 仟卡／日·噸，根據 Ryall 和 Lipton (1978) 內之 Van't Hoff 的規定，在 0°C~5°C 下青蔥之呼吸商 (Q_{10}) 為 2.4 代入下式：

$$Q_{10} = (R_2/R_1) \exp [10/(t_2 - t_1)]$$

式中

Q_{10} : 呼吸商

R_1 : 在 t_1 溫度下之呼吸熱; t_1 : 溫度

R_2 : 在 t_2 溫度下之呼吸熱; t_2 : 溫度

$Q_{10}=2.4$ $t_1=4.4^{\circ}\text{C}$ $t_2=5^{\circ}\text{C}$

$R_1=1,720$ 仟卡/日·噸

$$\therefore \left(\frac{R_2}{1,720}\right)^{16.67}=2.4$$

或

$R_2=1,821$ 仟卡/日·噸

同理可求得在 20°C 下青蔥之初期呼吸熱為 7,313 仟卡/日·噸與平衡時之呼吸熱 6,629 仟卡/日·噸。

現以表一、中青蔥的呼吸熱利用呼吸商換算之資料與這次實驗所測得結果比較列於表二中。可發現無論在 5°C 或 20°C 下的呼吸熱與國外的資料略有出入。可能跟青蔥的品種、生長環境和收穫時的條件不同有關。所以有必要建立臺灣蔬菜的呼吸熱，做為預冷與冷藏負荷設計之參考。

表二 比較國外資料與本次實驗之青蔥呼吸熱

種 類	呼吸熱 (仟卡/日·噸)	
	5°C	20°C
本 次 實 驗	4,267 ¹ (3,513) ²	13,443 (11,905)
由表一所得	1,821* (1,612)*	7,313* (6,629)*

1. 無括號之數字為最初產生的呼吸熱。

2. 有括號之數字為近似均衡產生的呼吸熱。

*根據表一之資料，利用呼吸商 (Q_{10}) 估算之數值。

結 論

(1) 呼吸率可能隨蔬菜的品種、生長的環境和採收時之條件有關，所以必須建立一套臺灣蔬菜的呼吸熱資料以供工程設計之參考。臺灣青蔥在 5°C 之初期呼吸熱為 4,627 仟卡/日·噸，其平均呼吸

熱為 3,513 仟卡/日·噸；在 20°C 時之初期呼吸熱為 13,443 仟卡/日·噸。其平均呼吸熱為 11,905 仟卡/日·噸。

(2) 蔬菜的呼吸率隨貯藏溫度之不同時，亦有差異，貯藏溫度較高，則蔬菜呼吸率較高，貯藏溫度較低時，則呼吸率較低。因此，蔬菜的呼吸率可做為蔬菜貯藏期的指標。

(3) 蔬菜的呼吸率為冷藏能力或預冷負荷的預估之基本資料，以青蔥 20 公斤由 30°C 預冷至 0°C 為例呼吸熱佔田間熱的 1~3.1%。或佔預冷負荷之 0.9~2.2%。可以用田間熱之 3% 或預冷負荷之 2% 來估算蔬菜之呼吸熱。

致 謝

本文所用之試驗設備承蒙臺大園藝系林宗賢教授之大力支援，特此申謝。

參 考 文 獻

1. 王妍。1981. 蔬菜的處理、運輸與貯藏。徐氏基金會出版社初版：1-13 頁。
2. 許炎和。1984. 基礎氣相色層分析。國興出版社初版：254 頁。
3. 1982, Handbook & Product Directory, Applications, ASHRAE, 1791 Tullie Circle NE, Atlanta, GA 30329, U. S. A.
4. 1985, Handbook & Product Directory, Fundamentals ASHRAE, 1791 Tullie Circle NE, Atlanta, GA 30329, U. S. A.
5. Claypool, L. L. and R. M. Keefer. 1942. A Colorimetric Method for CO_2 Determination in Respiration Studies. Proc. Amer. Soc. Hort. Sci. 40:177-186.
6. Ryall, A. L. and W. J. Lipton. 1978. Handling, Transportation and Storage of Fruits and Vegetables, Vol. 1. AVI Publishing Company, Inc, Westport, Connecticut, U. S. A.
7. Wang, J. K. and H. M. Gitlin 1964. Vacuum Cooler: Principles and Design Criteria. Univ. of Hawaii, Coop. Ext. Ser. Bull 69.