

穀倉機械化作業之研究

II. 機械強制通風方式控制貯倉稻穀溫度之效果

Study on the Mechanization of Grain Storage System

II. Effect of Forced Aeration on the Temperature Controlling of a Paddy Warehouse

國立臺灣大學農業機械工程學系副教授

盧 福 明

Fu-ming Lu

摘 要

本研究選定新竹縣新豐鄉農會松柏林倉庫第14號谷倉為試驗倉。試驗倉內長 29公尺，寬 11.6 公尺，100 坪，貯谷高度 6 公尺，共貯存 70 年 1 期蓬萊穀 1123.089 公噸，進倉日期為 70 年 8 月 16 日。試驗倉配備有 5 馬力通風機 3 臺。試驗倉內裝設有熱偶線溫度探針，每小時自動記錄谷溫變化。

本文為分析民國 71 年 4 月到 11 月共 8 個月的稻穀溫度變化。分析結果指出穀倉內稻穀溫度並不隨外界氣溫早晚的變化而馬上變動，但谷溫隨季節溫度變化而變動的趨勢甚為明顯。夏季通風降低谷溫速率低，但通風後谷溫回升速率高，冬季通風結果與夏季通風相反。

夏季時節在充分通風後，降低谷溫效果持續時間約 17 天。通風後，各層谷溫每日回升率，夏季介於 0.17°C 到 0.66°C 之間，冬季介於 0.12°C 到 0.33°C 之間。

通風後谷層溫度保持為上層為高溫區，中層為中溫區，下層為低溫區。試驗結果顯示強制通風法可有效控制稻穀溫度。

Summary

The object of this paper is to investigate the efficiency of forced aeration on the temperature controlling of a paddy warehouse. Aeration experiment were carried out in a paddy warehouse of 29×11.6m², loaded with 1123 tons of rough rice and equipped with three units of 5-horsepower fan. Continuous and intermittent aeration methods were adopted to find the best procedure in controlling the paddy temperature.

The results show that the monthly average paddy temperatures follow closely with season's air temperature variation, but the diurnal paddy temperatures were not affected significantly by the diurnal ambient temperatures. The recovery of paddy temperatures after aeration were 0.17 to 0.66°C per day in summer season and 0.12 to 0.33°C per day in winter season. In order to obtain maximum efficiency the aeration time for each aeration pass should be longer than eight hours both in continuous and intermittent aeration procedures. The intermittent aeration procedure was found having better efficiency than the continuous aeration procedure.

一、前言

臺灣每年一、二期作所生產稻穀由糧食局購入一部份貯存於各地鄉鎮市農會穀倉，近年來稻穀產量增加，倉容不足的現象有增無減。由於各界努力增建新倉的結果，農會穀倉容量已由民國六十三年之 69 萬公噸增加到 69 年的 127 萬公噸，6 年之間農會穀倉容量增加 58 萬公噸約 0.84 倍，平均每年約增加 9.6 萬公噸倉容量。據統計資料指出，民國 69 年全省農會穀倉共有 2,618 棟，其中以磚造倉庫為最多，有 1,299 棟，容量 466.2 萬公噸，鋼筋水泥散裝倉庫有 566 棟，容量 456.7 萬公噸，鋼筋水泥袋裝倉庫 380 棟，容量 218.8 萬公噸，圓筒散裝倉庫 19 棟，容量 11.8 萬公噸，老舊的木造、土塊和臨時性的力霸倉庫仍有 354 棟，容量 116.6 萬公噸⁽¹⁾。

糧食局委託各鄉鎮農會辦理公糧經收保管加工業務，稻谷保管貯存期間，應防止稻谷發燒、受潮、蟲害和變質等現象，以減少因長期貯存所導致的損耗。目前農會稻谷貯存期間約 1 年到 1 年 6 個月。貯谷溫度的高低，一般作為貯谷品質變化的量測指標。據試驗資料指出，大部分貯谷品質敗壞的原因，大都係谷溫過高，超過 40°C 所致者。因之降低貯谷溫度乃為倉貯管理之一大目標。

稻谷進倉後之貯存期長達一年以上，倉貯期間受到大氣環境的影響，如發生病蟲害，稻谷吸濕回潮程度嚴重時，都易升高谷溫而使貯谷長久處於不利的環境之下。在國外有關微氣象環境的變化影響穀物的研究大多偏重於稻谷以外的穀物⁽¹⁰⁾。至於稻谷長期性貯存期間受到大氣影響程度之研究，近年來在國內漸受重視^(2, 3, 4, 5, 6)。

舊有散裝谷倉之通風方式大都採用竹箴通風筒，約每隔 2 到 3 公尺放置一筒，採自然對流通風方式。另在谷倉內裝設有窗型抽風機，此種小型抽風機配合竹箴通風筒使用時僅可排出倉內谷面上之熱空氣，並不能有效控制谷層間之稻谷溫度。因此稻谷於長期貯存期間大都維持在 35~40°C 之高溫狀態之下，若稍疏於翻倉或抽風，易使谷溫超過 40°C 以上增加變質米的發生率⁽²⁾。是故有效的通風方式如裝設強制式通風機以控制貯谷溫度，在倉貯管理上是必須採行的。

近年來新建糧倉中，大都配備有強制式通風裝置用以控制谷溫。據 70 年糧食局資料指出，此種

新建散裝糧倉共計有 84 座，其中 800 坪集中型谷倉 18 棟，200 坪半密閉式谷倉 66 棟。通風機馬力介於 2~7.5 馬力，每坪谷倉可貯穀 7~8 公噸。強制式通風方式乃是藉助強力送風機將外界空氣送入谷倉底部通風溝內，空氣由下層稻谷流向上層稻谷時，將谷層間熱氣帶出倉外，獲致降低與控制貯谷溫度的效果。

二、研究目的

在臺灣目前倉貯環境之下，由於有關稻谷倉庫強制通風的結果及與通風效果相關之因素，諸如不同谷層溫度之變遷、通風降低谷溫速率、通風後谷溫回升速率、外界氣溫變化與最佳通風時機及通風時數的關係、和季節與通風頻度的關係等等資料仍然欠缺完整的分析報告，因此在執行強制式通風作業時，往往因為缺少學理的指導而降低裝置通風設備的效益。因此為了徹底發揮強制式通風設備的效益，適時適量通風，減少能源浪費，確有必要探討最佳的強制通風方法。

本研究目的即為在提升穀倉機械化作業程度與效率的目標下，建立起稻谷長期貯存期間，強制式通風法降低谷溫效果之試驗資料，提供糧食局和各級農會倉貯管理作業之參考依據。

三、試驗材料及方法

本研究選定新竹縣新豐鄉農會松柏林倉庫第 14 號鋼筋水泥谷倉為試驗倉。試驗倉座向南北，倉內長 29 公尺寬 11.6 公尺，共 100 坪，貯谷高度 6 公尺，共貯存 70 年 1 期蓬萊谷 1123.089 公噸，進倉日期為 70 年 8 月 16 日。71 年 4 月 2 日取樣稻谷含水率為 10 %。試驗倉配備有 5 馬力通風機 3 臺，靜壓 70 mm 水柱，風量 100 CMM。鋼筋水泥通風倉如圖 1 所示，圖 1 包括兩個倉，本研究所用試驗倉位於圖上右半部。

以熱偶線所製成的探針量測大氣溫濕度及谷溫。溫度探針擺設位置及倉內通風溝如圖 2 所示。溫度探針埋設於谷層的深度計有上層（谷層面下 1 公尺），中層（谷層面下 2.5 公尺），下層（谷層面下 4 公尺）和底層（5.5M）。使用 KAYE DIGI STRIP II 資料自動記錄器(DATA LOGGER)定時記錄溫度變化。平常谷倉沒通風時每 1 小時自動讀取一次溫度資料，通風降低谷溫時每 10 分鐘自動讀取一次溫度資料。有關谷倉設備和試驗裝置如圖 3 所示。

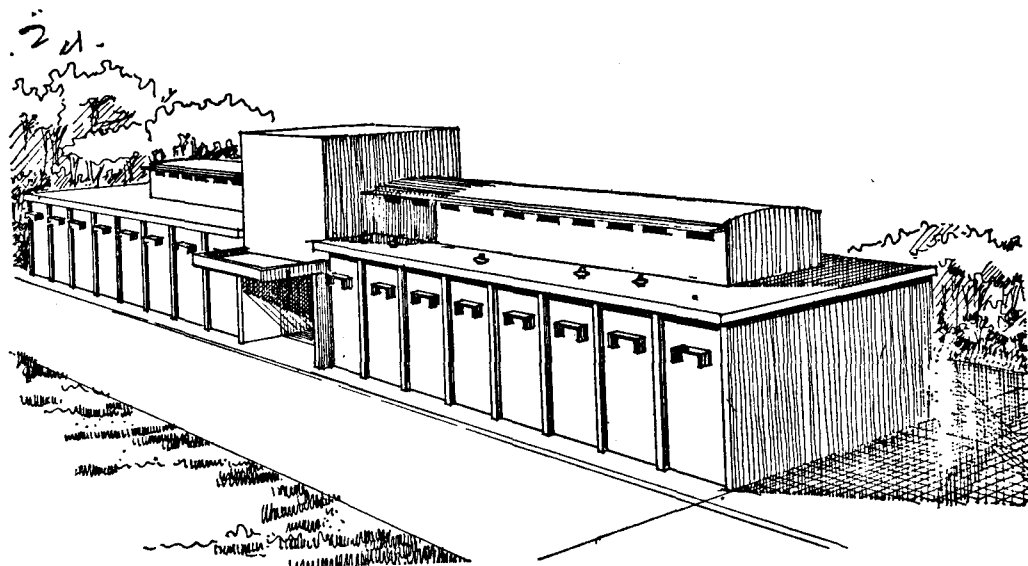


圖 1. 新竹縣新豐鄉農會松柏林倉庫 14 號鋼筋水泥通風谷倉

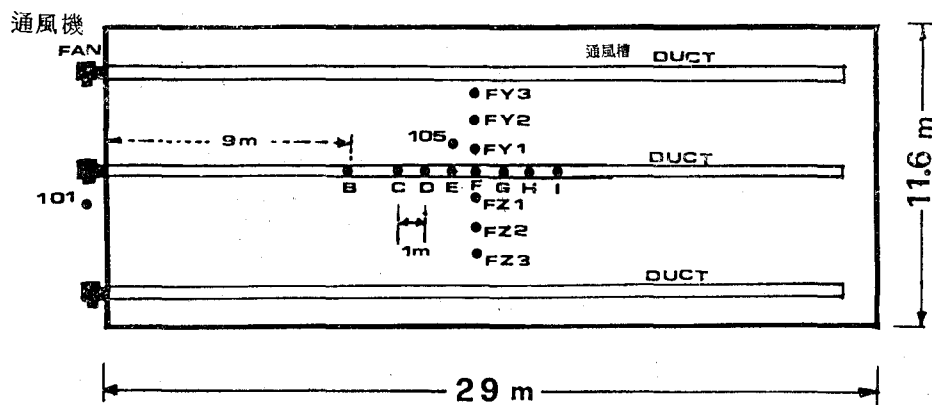


圖 2. 溫度測點位置分佈圖

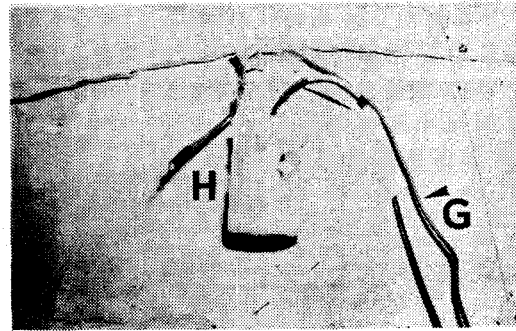
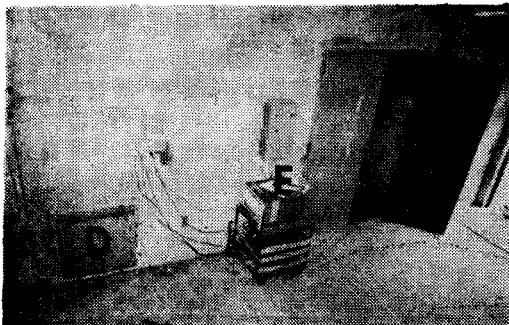
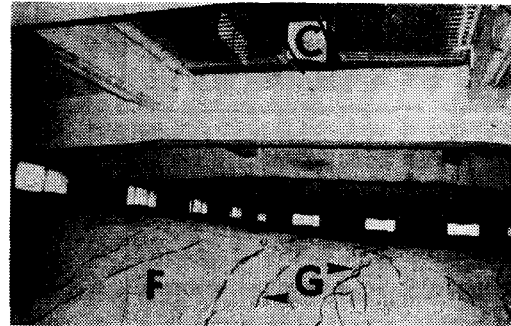
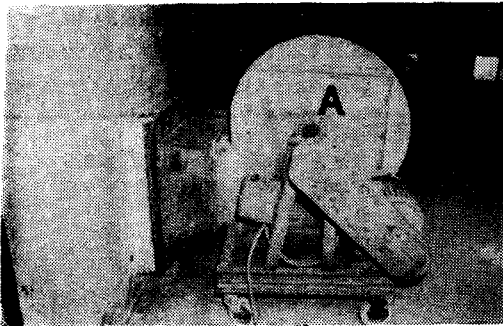
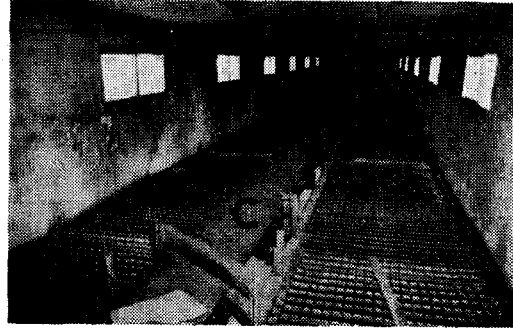
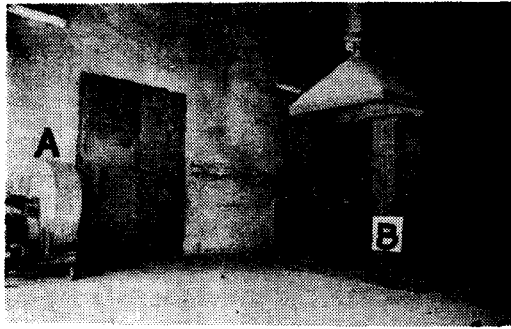


圖 3. 谷倉設備與試驗裝置

- A. 5 hp 通風機 B. 箕斗式昇降機 C. 倉頂帶式輸送機
 D. 通風槽入口 E. 48 點資料自動記錄器 (DATALOGGER)
 F. 倉內谷層表面 G. 熱偶線 H. 倉外大氣乾濕球溫度感應熱偶線

四、結果與討論

1. 稻谷溫度與氣溫變化之關係

新豐鄉農會松柏林倉庫第 14 號強制式通風倉稻穀月平均溫度如表 1 所示。由 71 年 4 月到 11 月的月平均溫度及每小時谷溫記錄原始資料顯示，日夜間谷溫雖然幾乎維持定值，並不隨外界氣溫早晚之變化而迅速增減，但谷溫隨季節溫度的變化而變動的趨勢則甚為明顯。

以鄰近谷倉中央位置的測點 F 為例，4 月時平均氣溫 18.3°C，平均谷溫為底層 23°C、下層 23.4°C、中層 26.7°C、上層 26.1°C。到了 6 月時，平均氣溫升高到 25.8°C，而平均谷溫也上升為底層 30.4°C、下層 31.2°C、中層 32.5°C、上層 33.6°C。4 月到 6 月之間平均氣溫約增加 7.5°C，而各層谷溫由 4 月到 6 月之間的平均增加量為上層 7.5°C、中層 5.8°C、下層 7.8°C、底層 7.4°C，總平均增加量為 7.1°C。

表 1 新豐鄉農會松柏林倉庫第 14 號強制式通風倉穀穀溫度月平均值 °C

月份	倉外氣溫 測點 101	倉外大氣濕度 % 105	倉內氣溫 105	B	C	D	E	F	F	F	F	FY3	FY2	FY1	FZ3	FZ2	FZ1	G	H	I
				下	上	中	下	上	中	下	底	上	中	下	上	中	下	上	中	下
				203	104	204	304	106	206	306	305	108	208	308	109	209	309	311	211	111
4	18.3	89	18.2	24.0	27.0	26.7	23.5	26.1	26.7	23.4	23.0	26.0	26.3	23.9	27.3	27.3	24.9	23.8	26.7	26.5
5	25.3	88	25.4	28.6	32.1	30.6	27.9	31.4	30.4	27.6	25.7	31.2	30.5	27.1	33.3	31.7	29.5	28.1	30.5	31.6
6	25.8	88	25.9	32.9	34.3	32.9	31.5	33.6	32.5	31.2	30.4	33.6	32.7	31.0	35.6	33.6	31.7	31.4	32.6	33.8
7	23.3	92	30.5	35.5	37.3	36.1	35.3	36.9	35.9	35.1	34.0	36.4	35.7	34.9	37.6	36.1	35.1	35.3	35.8	36.9
8	23.6	79	29.6	37.2	37.5	36.6	35.6	37.1	36.6	35.0	32.6	36.7	36.2	34.9	37.5	36.6	35.0	35.4	36.6	37.4
9	27.3	82	28.3	36.6	37.0	37.0	36.4	37.1	37.6	36.0	32.5	37.2	37.2	34.7	36.8	37.3	34.1	36.4	37.7	37.1
10	24.4	85	24.9	35.0	36.7	36.7	35.7	37.2	36.9	35.6	29.8	37.7	37.4	35.2	36.7	37.0	33.8	35.7	37.0	37.0
11	22.1	83	22.0	33.8	34.2	33.9	33.8	34.6	33.8	33.8	30.2	35.3	35.6	33.9	34.8	36.1	32.8	33.1	33.7	34.2

註：* 本表為 1982 年 4 月到 11 月的溫度資料，為每日上午 7~10 點之最高溫度值之月平均。
 * 表內英文字代表測點距離風機的遠近，第一字母相同者表示測點與風機的縱向距離一樣，請參看圖 2。
 * 上、中、下和底表示測點在谷層的垂直位置，上層（谷層面下 1 公尺），中層（谷層面下 2.5 公尺）下層（谷層面下 4 公尺），底層（谷層面下 5.5 公尺）。
 * 數字為儀器接點番號。

由圖 4 谷倉中央點之上中下和底層月平均谷溫的變化曲線可看出谷溫隨氣溫變化而變化的相關性。7、8、9 月間大氣溫度高，谷溫也高；10 月、11 月氣溫漸低時，谷溫也呈下降趨勢。雖然在 4 月到 11 月之間曾隨機通風降低了谷溫，但在通風之後，谷溫的變化仍然受到季節性氣溫變化的影響。

谷溫與氣溫的相關性變化在筆者及其他研究者的谷倉研究資料中也指出其相關趨勢^(2,3,4,5,6,7)。圖 4 中，底層稻谷靠近通風溝，其溫度變化與大氣溫度的變化關係最為顯著。4 月到 11 月間相對濕度約介於 80% 到 90% 之間。

由於通風降溫的效果，使熱氣向谷層上方排出，

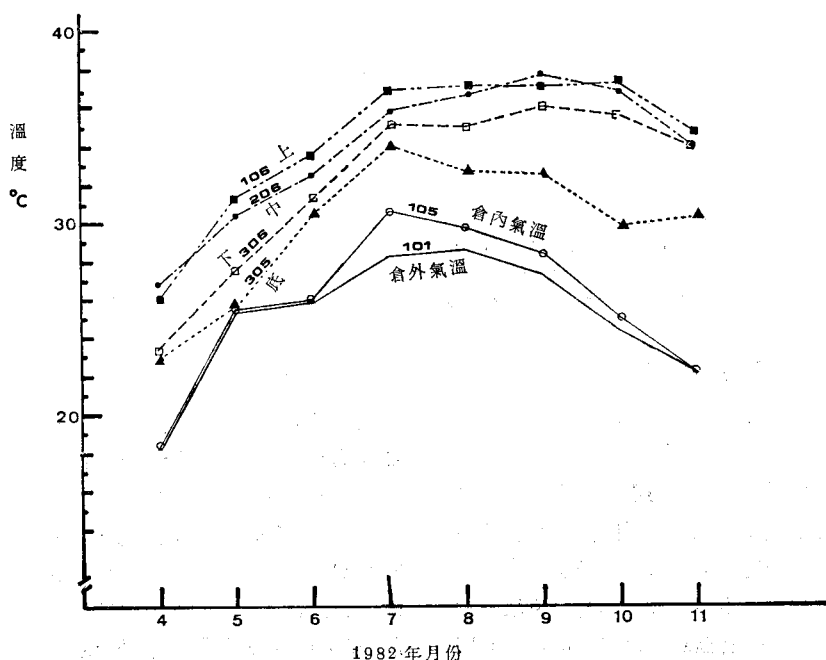


圖 4 谷倉中央位置上中下底層谷溫 and 倉內氣溫及倉外氣溫月平均值

因此在通風後，谷溫的梯度是上層高溫，下層低溫的關係。而一般通風不良的谷倉是以中間層的谷溫為最高^(2,8,9)。

本研究結果指出在谷倉內不同位置但同一深度的谷溫間的差距小如圖 5，但在同一位置不同谷層間的溫度差距則較為明顯如圖 4 所示。

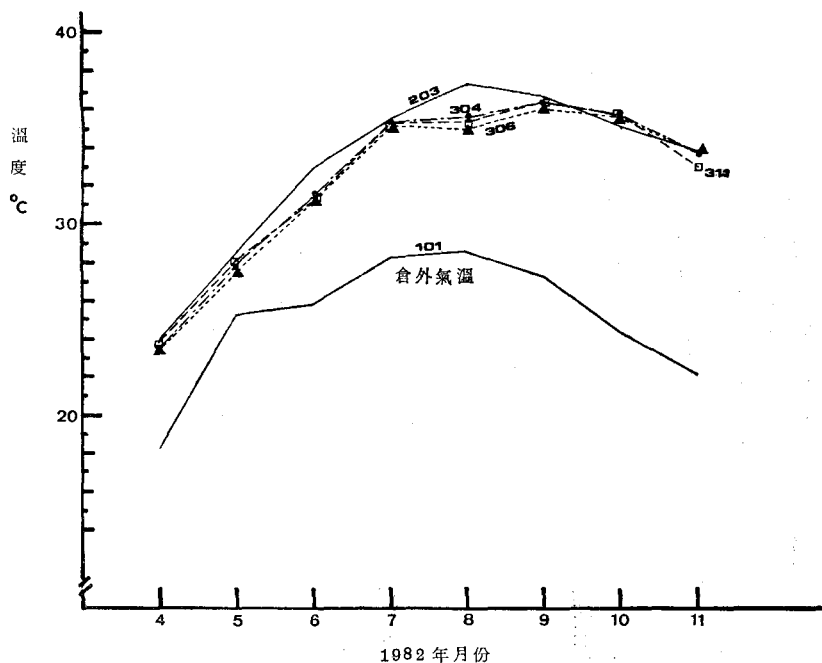


圖 5. 谷倉內相同深度(下層)不同位置谷溫月平均值

2. 通風降低谷溫的速率

(1) 夏季通風

民國71年 8 月 3 日 17:00時開始通風到 8 月 4 日 7:30 時，連續通風 14.5小時之後，谷倉中央底層谷溫由 39.2°C 降為 31.8°C，減少 7.4°C；下層谷溫由 39.8°C 降為 35.2°C，減少 4.6°C；中層谷溫由 38.5°C 降為 38.0°C，只減少 0.5°C；上層谷溫反而從 38.6°C 升高到 41.2°C (8 月 4 日 5:32 時) 再降到 40.7°C，淨增加 2.1°C；通風期間外界氣溫介於 27~29°C 之間，相對濕度介於 80%~93% 之間，通風降溫情形如圖 6 所示。通風時熱氣通過谷層上方，導致上層稻谷吸收熱氣而增高谷溫。剛開始通風時中層和下層的谷溫也呈現先升高再下降的現象，如圖 6 左方曲線。因此當上層谷溫開始下降時，谷層間的熱氣才算已通過上層稻谷而開始排出倉外，此時才有通風散熱效果，也就是經有效的過通風後，熱氣才不會堆積在上層稻谷。

8 月 4 日 7:30 時到 17:25 時之間停止通風期

間谷層溫度維持不變。於 8 月 4 日 17:25 時再開始通風到 8 月 5 日 8:25 時，連續通風 15 小時，底層谷溫由 32°C 降為 31.9°C，減少 0.1°C；下層谷溫由 35.3°C 降為 34.4°C，減少 0.9°C；中層谷溫由 38.3°C 降為 36.0°C，減少 2.3°C；上層谷溫由 40.9°C 降為 37.8°C，減少 3.1°C。由此可看出在第二次連續通風時，下層和底層谷溫下降量少，而中、上層谷溫下降量較大，也即降溫效果比較第一次通風為低。第二次通風時大氣溫度介於 29°C 到 27°C 之間，相對濕度介於 78%~89% 之間。

夏季氣溫雖高，通風仍然可以降低谷溫，但降低速度在第一次通風時較大，第二次通風時較小。每次開始通風 4 小時內的谷溫降低速率較大，通風 4 小時之後降溫速率漸緩。通風中，被壓送到通風溝內的空氣溫度約比大氣溫度高 1~2°C。

夏季通風降低谷溫的速率在 8 月 3 日第一次通風 14.5 小時，各為底層 0.51°C/時，下層 0.31°C/時，中層 0.03°C/時，而上層溫度反而升高其溫度升高速率 0.14°C/時，此表示熱氣只由下層轉移到上層，仍未完全排出谷層面。

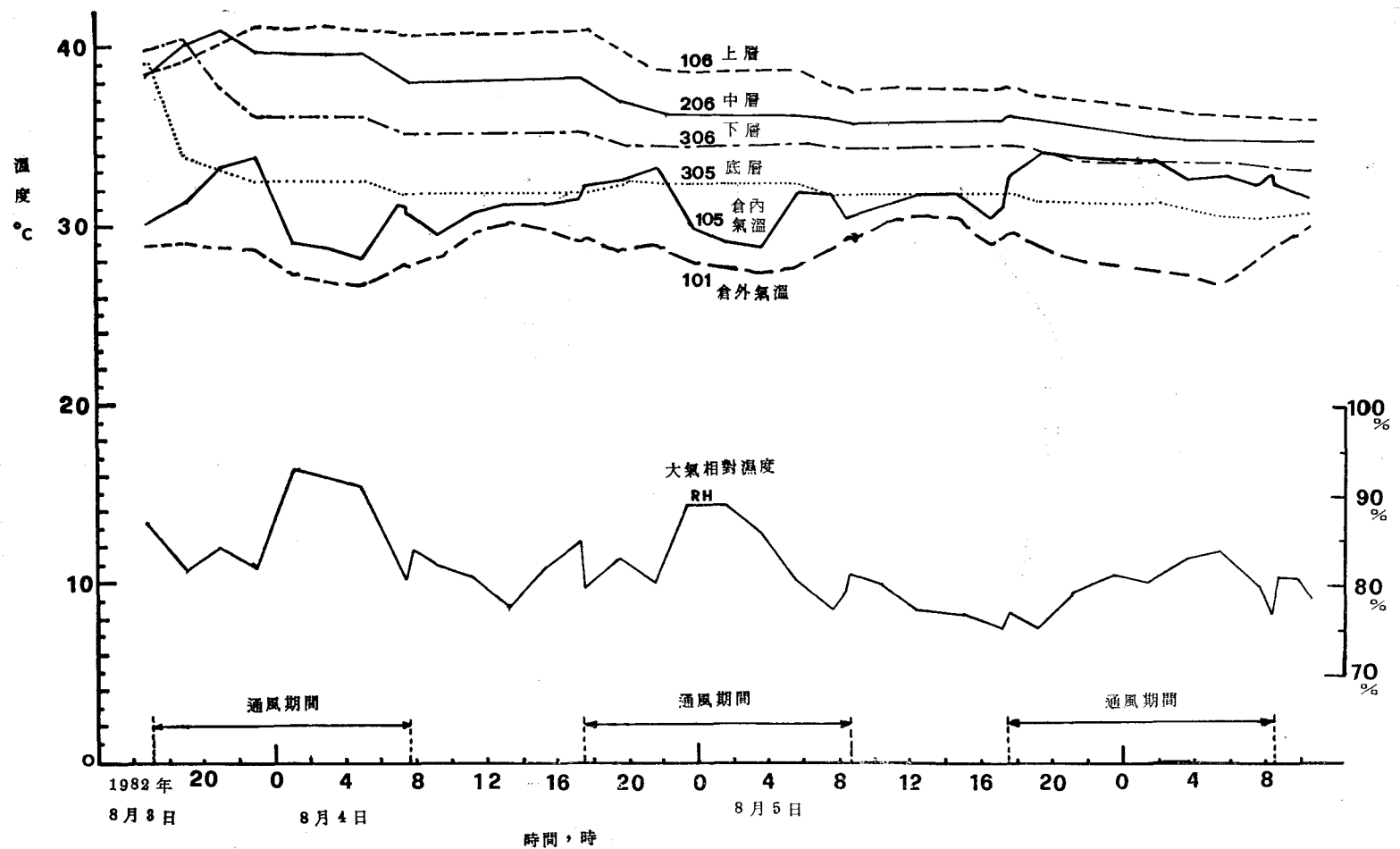


圖 6. 夏季通風各層谷溫下降情形

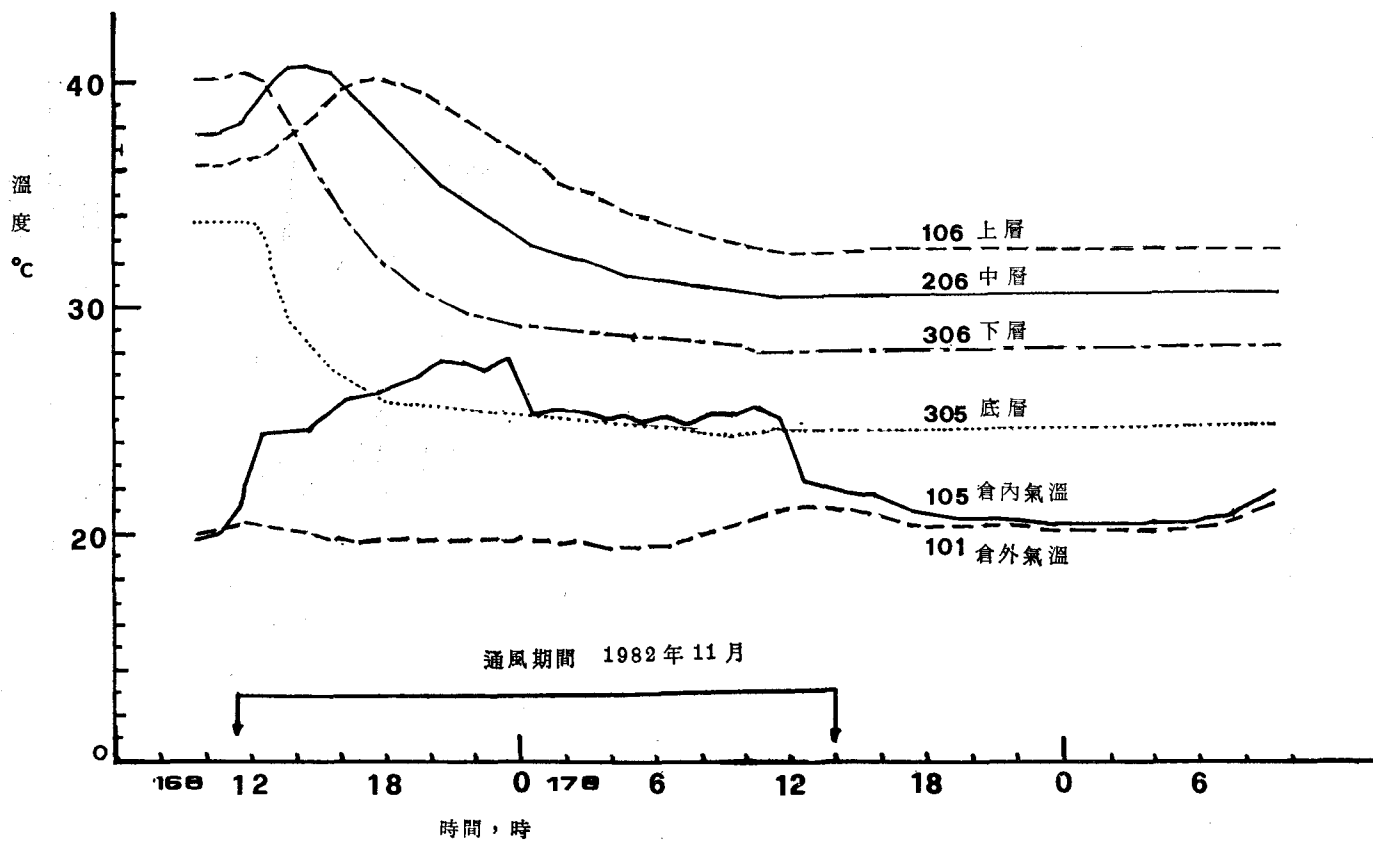


圖7. 冬季通風各層谷溫下降情形

8月4日第二次通風 15 小時，各層稻谷溫度下降速率為底層 0.006°C/時，下層 0.06°C/時，中層 0.15°C/時，上層 0.20°C/時。

第一次通風和第二次通風降低谷溫速率資料指出在第一次通風時，底層和下層稻谷已充分降低溫度。而中、上層稻谷在第二次通風時才充分降低溫度。因此執行通風作業時，應確使各層稻谷溫度充分降到最低點時或較通風前溫度為低時才可停止通風，也即通風使各層谷溫下降速率由快變緩時才算是達到了充分降溫的效果。

(2) 冬季通風

民國71年 11 月 16 日上午 11:30開始通風到 11 月 17 日下午 14:00 連續通風 26.5 小時，通風期間外界氣溫介於 20~23°C 之間。通風時，除了底層谷溫馬上降低之外，上、中和下層谷溫都是先升高之後再下降，顯示熱氣由底層向上層移動的現象，冬季通風降溫情形如圖 7。

通風 26.5 小時之後底層谷溫由 33.9°C 降為 24.6°C，減少 9.3°C，降溫率 0.35°C/時；下層谷溫由 40.3°C 降為 28.1°C，減少 12.2°C，降溫率 0.46°C/時；中層谷溫由 38.1°C 降為 30.6°C，減少 7.5°C 降溫率 0.28°C/時；上層谷溫由 36.4°C 降為 32.5°C，減少 3.5°C，降溫率 0.01°C

/時。降溫率以上層最低。圖 7 中各層谷溫降低速率(降溫率)指出冬季通風較易充分降低各層谷溫。

三台通風機同時開動時之用电量約為每小時 19 度，通風量約為 0.2CMM/Ton。

將來擬由本研究所得結果資料繼續進行有關通風降低谷溫的模擬與預測谷倉溫度變動趨勢之探討。

3. 通風後谷溫回升速率

民國71年 8 月 3 日到 8 月 7 日連續五天施行五次夜間通風 (17:00~8:00)，停止通風後谷溫即緩慢回升。自停止通風日期 8 月 8 日計算到下次通風日期 8 月 19 日，也即在 11 天之內，谷溫回升情形分別為底層由 28.9°C 升高到 36.2°C，增加 7.3°C，溫度回升率 0.66°C/日；下層由 31.9°C 升高到 35.8°C，增加 3.9°C，回升率 0.35°C/日；中層由 34.7°C 升高到 37.6°C，增加 2.9°C，回升率 0.26°C/日；上層由 36.3°C 升高到 38.2°C，增加 1.9°C，回升率 0.17°C/日。通風後各層谷溫回升率介於 0.17°C/日到 0.66°C/日之間，以底層谷溫回升率最高，上層回升率最低。

由谷溫回升率推算通風冷却效果持續時間，即通風後谷溫回升到未通風前的谷溫所需時間，在夏季時節充分通風後冷却效果持續時間約 17 天，通風

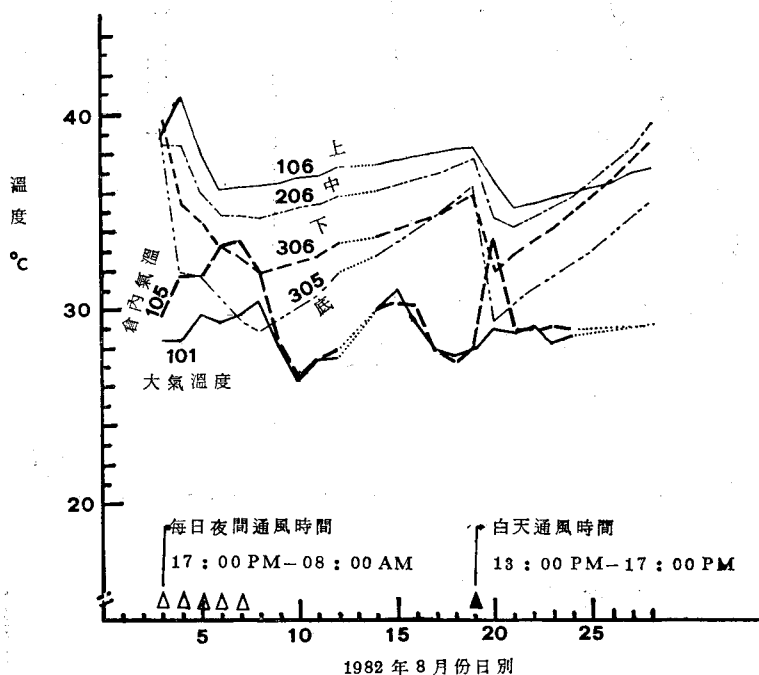


圖 8. 通風後谷溫回升趨勢

後谷溫回升趨勢如圖 8 所示。

11 月 16 日連續通風 26.5 小時後 (11:30 到 17 日 14:00) 約經過 20 天之後, 只有上、中層谷溫回升到未通風前谷溫, 而底下層谷溫仍低於通風前谷溫約 5°C。

為方便與夏季通風效果比較, 以通風後 17 天的谷溫變化來計算冬季通風後谷溫回升率, 計為底層由 24.6°C 升到 30.3°C, 回升率 0.33°C/日; 下層由 28.6°C 回升到 33.5°C, 回升率 0.28°C/日; 中層由 31°C 回升到 35.8°C, 回升率 0.28°C/日; 上層由 33.3°C 回升到 35.5°C, 回升率 0.12°C/日。冬季底層谷溫回升率高, 而上層谷溫回升率低, 此現象剛好與夏季 8 月間通風後谷溫回升的現象相反。此種差異似與底層稻谷靠近通風溝有關。

冬季通風後各層谷溫回升率介於 0.12~0.33°C/日, 比較夏季通風後谷溫回升率約低 0.05~0.33°C/日。

五、結 論

本研究使用新竹縣新豐鄉農會松柏林倉庫進行強制式通風倉通風效果之研究。由民國 71 年 4 月到 11 月共 8 個月間的稻穀溫度資料及通風試驗分析結果所得結論如下:

- (1) 日夜間谷溫變化甚小, 谷溫並不隨外界氣溫早晚的變化而馬上變動, 但谷溫隨着季節溫度變化而變動的趨勢甚為明顯。
- (2) 夏季實施谷倉通風時降低谷溫速率低, 通風後谷溫回升速率高, 冬季通風結果與夏季通風剛好相反。
- (3) 通風時, 各谷層即上、中、下和底層谷溫之下降速率必須都由快變緩之後, 才有充分通風降溫的效果。
- (4) 夏季時節在充分通風後, 降低谷溫效果持續時間

約 17 天。通風後, 各層谷溫每日回升率介於 0.17°C 到 0.66°C 之間。冬季通風後, 各層谷溫回升率介於 0.12°C 到 0.33°C 之間。

六、參 考 文 獻

1. 糧食局 1981. 臺灣區穀類倉庫調查報告。臺灣省糧食局
2. 盧福明、陳貽倫 1978. 改善稻穀倉庫機械設備之研究。中國農業工程學報 24(1):28-39.
3. 盧福明 1981. 圓筒倉貯存稻穀之研究 (II) 結果報告。中國農業工程學報 27(3):14-27.
4. 盧福明、賈精石 1982. 穀倉機械化作業之研究。I. 稻穀倉庫翻機與簡易式塑膠浪管通風系統。中國農業工程學報 28(1):80-86.
5. 彭錦樵 1982. 鐵皮圓筒通風倉貯藏稻穀適用性之初步研究。中國農業工程學報 28(3):82-100
6. 張長泉、劉廷英 1981. 稻穀袋裝與散裝貯存之比較。食品工業發展研究所研究報告第 215 號。
7. Gupta, A. P., R. C. Maheswari and T. P. Ojha 1981. Structural Properties of Bamboo and its Composites as Building Material for Rural Grain Storage Structures. Improvement of Post-harvest Facilities and Systems, Proceeding of the 4th Annual Workshop on Grain Post-harvest Technology Southeast Asia Cooperative Post-harvest Research and Development Programme, P407-442.
8. Prevett, P. F. 1959. An Investigation into Storage Problems of Rice in Sierra Leone. Colonial Research Studies No.28, Published by her Majesty's Stationery Office, London.
9. 陳辰嘉 1977. 圓庫貯藏穀物之管理。雜糧與畜產 47 期 26~32 頁。
10. Smith, C. V. 1969. Meteorology and Grain Storage. Technical Note No. 101 World Meteorological Organization.

(上接第 51 頁)

16. C. S. Fang & S. N. Wang, "Groundwater Flow in a Sandy Tidal Beach Two-Dimensional Finite Element Analysis." Water Resources Research Vol. 8, No. 1.
17. AIT Hydraulic Laboratory Manual "Hele-Shaw Model", 1969.
18. Zienkiewicz, "The Finite Element Method," Third Edition, 1977.
19. Sirous, "Two-Dimensional Finite Element Analysis of Transient Flow and Tracer

- Movement in Confined and Phreatic Aquifers" Michigan State University, 1977.
20. Bredeheft & Pinder, "Digital Analysis of Area Flow in Multiaquifer Ground Water System; A Quasi Three Dimensional Model" Water Resource Vol. 6, No. 3.
21. Segerlind, "Applied Finite Element Analysis", 1976.
22. Desai & Abel, "Introduction to the Finite Element Method", 1972.