

噴氣式深耕機最佳作業條件之研究

Study on the Optimum Operation of a Pneumatic-cultivator

國立中興大學農業機械工程學系講師

彭 錦 樵

Jiin-Chyau Pen

摘 要

噴氣式深耕機是利用高壓空氣 (10 kg/cm^2) 於瞬間在土壤深層 (45 cm 深) 噴出, 以改善土壤物理性之一種深耕機械, 其作業方式不同於一般之傳統式或人工之中耕法。本研究探討土槽中噴氣後土壤所承受之反作用力與土壤深度、作用半徑等之關係, 並以葡萄為例, 測定其根羣之抗剪力, 配合葡萄生長特性與土槽試驗等資料, 以建立噴氣作業之模式。

試驗結果顯示:

1. 葡萄根之抗剪力與根之直徑成正比, 而與根距植株之距離成反比。
2. 深耕機作業時, 其高壓空氣造成之土壤反作用力與土壤深度成正比, 而與作用半徑成反比。
3. 對砧木品種三年生之葡萄而言, 其最佳深耕作業條件為噴氣點距植株 72cm。
4. 對於其他須深耕作業之作物, 只需測定根之抗剪力及其生長特性, 可同理應用此模式以求得該作物之最佳噴氣作業條件。

Abstract

A pneumatic-cultivator which has high-pressure air (about 10 kg/cm^2) blown in deep soil (45 cm under soil surface) is different from the traditional [mechanical cultivator in performance. Tests were designed and conducted to find out the optimum operation model of such a cultivator. The chosen sample crop was three-year-old grape.

Results showed:

1. The allowable shearing force of grape root is proportional to the diameter of the root, and inverse proportional to the distance from the trunk to the trailed root.
2. The force impacted to the soil by high-pressure air is proportional to the depth, and inverse proportional to the effect radius.
3. The optimum operation distance for three-year-old grapes is 72 cm from the grape trunk.
4. The operation model built for grapes can be transfered to other crops whose growing characteristics and root strength have been known.

一、前言

由於工商社會之演進，農村經濟結構亦隨之改變，使得農村勞力大量湧向都市，造成農村勞力普遍缺乏現象，因之，農業機械化乃是必然之結果。農業機械化愈成功，機械之平均馬力數也愈大，換言之，土壤被農業機械壓實的情形也就愈嚴重，使得作物之根系無法獲得良好之發育，產量亦間接受到影響。此種情形對深根性作物之影響尤為顯著。因此，如何改善作物之中耕管理作業，使作物在生長過程中能有良好的生長環境，俾能有最高的產量，此乃農業機械化中不容忽視的重要課題。

目前本省園藝作物、特用作物以及雜糧作物之中耕管理作業，由於受到作物種類、地形等之限制，無法使用大型農機具，大部份仍以人工或小型中耕管理機來作業，費時費工。一般機械式中耕法是以小型中耕機附裝迴轉中耕爪，以行中耕作業，人力式則以鋤頭行之，此兩種方式之最大缺點乃為它們都會犁翻土壤而將根羣切斷，且中耕深度僅及土壤表層 20cm 以內。對於根系發育較淺之作物，很容易將作物之根切斷，而影響作物之發育及產量，對於根系發育較深之作物，則不但其表層之根系易被切斷，且會因機械之壓實使得土壤緊密而令深層之根更不易生長，故以上兩種方式之中耕作業，並非一最佳之中耕方式。

日本岩谷牌噴氣式深耕管理機（バンダー深耕機），是採用高壓空氣（約 10kg/cm²）於瞬間噴入土壤，使土壤鬆動，以達中耕效果之一種噴氣式深耕機（Pneumatic cultivator）。

此機械之最大特色就是中耕深度較傳統機械式者為深，且以氣動方式改善土壤物理性，不會犁翻土壤。

若噴氣式深耕機作業時距離作物太近，則會由於高壓空氣在土壤中噴出時造成作物根系之嚴重傷害，而影響作物之生長與產量；如果作業時距離作物太遠，則土壤鬆動範圍無法影響到作物之根系發育，亦徒然浪費人力、財力，對於作物之發育並無助益。究竟應如何決定噴氣式深耕機之最佳作業條件，則必須配合作物根系之抗剪力測定以及土壤受高壓空氣撞擊後之反作用力等分析資料，才能針對此種作物，建立一最佳之噴氣深耕作業條件。本研究乃以三年生砧木品種之葡萄為例，研究噴氣式深耕機之最佳作業條件。

對其他深根性作物，可按相同方法，只需測定其根之抗剪力及瞭解其生長特性，即可決定該作物之最佳作業條件。

二、文獻探討

（一）土壤與作物生長之關係

作物之生長，須靠光合作用以及土壤中之水分和養分，此外，土壤必須提供一個適當的環境，使作物之根羣能有充份之孔隙供其伸長，根羣呼吸作用所需之氧氣必須來源充足，產生之二氧化碳必須要儘快擴散至外界。根系之鞏固植株之能力與吸收土壤中水分和養分之能力，視土壤性質而異，也影響作物之產量⁽²⁾。因而，如何尋求最適宜根羣生長之土壤物理性、化學性及生物性，以及探討農機具耕耘時對土壤物理性之影響等，乃作物生長過程之管理作業上應研究改進之課題。

1. 土壤物理性

土壤質地，密實度、通氣性、水份含量（含水量）、機械阻力、土壤構造等均會影響作物根系之發育。通常，作物根系如果要生長良好，必須要有充份的水份及氧氣。土壤結構緊密，通氣不良之處，根之生長便受限制。茲就土壤構造、空氣、水份及機械阻力等分別說明其與作物生長之關係：

（1）土壤構造

依美國農部的土粒分級標準，土粒直徑在 0.002 mm 以下稱為粘粒（Clay），0.002~0.05mm，稱為粉粒（silt），0.05~2.0mm，稱為砂粒（sand），Martin 與 Waksman 兩氏發現微生物之成長，可誘使土壤粒子相互連結，隨而增加土壤團粒，有機物之型式亦對微生物之團粒生成有密切關係⁽¹⁾。若採用適宜的土壤管理法（如施用石灰或有機物等）以增加土壤的團粒構造。則可期望作物得到較高之產量⁽²⁾。

土壤粒子之排列，可決定土壤孔隙之數量與性狀，在無水之土壤中，孔隙全部為空氣所充填；但濕土之孔隙則為空氣與水兩者所充填，而空氣與水之含量比率，則多受孔隙大小所影響。孔隙度（porosity）之定義為在一定體積的土壤中，孔隙所佔全部體積的百分率，亦即在 100ml 的土壤中，孔隙所佔的 ml 數即為土壤的孔隙度。其計算公式如下：

$$\rho_v = \frac{M_v}{V_t}, \rho_s = \frac{M_s}{V_t}$$

孔隙度 (%) = 100% - 固體物質體積 (%)

$$= 100 - \frac{\rho_b}{\rho_s} \times 100$$

$$= 100 \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} \right)$$

式中 ρ_b : 總體密度 (Bulk density) 或稱容重 (Volume weight)

ρ_s : 土粒密度 (Particle density) 或稱真比重 (Actual specific gravity)

M_s : 乾土重

V_s : 乾土體積

V_t : 全體積, (乾土及孔隙等之體積)

土壤若具有良好的構造, 則可增加土壤之孔隙。土壤間之孔隙可使空氣和水容易流通, 並可提供根部伸長, 微生物及小動物活動所需之空間⁽²⁾。

一般而言, 粘土含有多量的小孔隙, 可提高水分保持能力與延緩滲透。砂土則含有多量的大孔隙, 可迅速排水及具有較低的水份保持能力。Dorarenko 氏指出土壤空氣中氧的含量與硝酸生成量均與粗大孔隙含量有密切關係, 亦即非毛細管孔隙與土壤滲透性及作物根部發育有顯著的關係。理想的土壤必需含有粗略相等的大孔隙與小孔隙, 然後始有充份的通氣性、滲透性以及保水性, 而作物也才能使其根部獲得充分的發育, 自可增加作物之產量⁽¹⁾。

(2) 土壤空氣

Baver 氏分析土壤空氣對土壤物理性及作物發育之關係, 指出若土壤通氣不良, 會造成下列結果:

- (i) 限制廣大根系之發育。
- (ii) 阻礙根系所需要的呼吸作用, 遲滯水分及養分之吸收。
- (iii) 影響微生物作用之程度。

農機在田間之操作可直接或間接地使土壤通氣性惡化, 當土壤容積密度增加後, 孔隙度減少, 氧氣之擴散率會因而降低, 影響土壤與大氣間空氣之交換, 及減低土壤儲藏氧氣之量, 此為影響通氣性之直接因素。又由於飽和導水率降低, 使積留於根域內之雨水不易排除, 因而通氣不良, 是為間接因素⁽¹⁾。土壤空氣之組成係受季節、土壤特性、作物、耕耘、中耕與微生物活動等之影響。以體積計算, 大氣中含約 79% 之 N_2 , 21% 之 O_2 及 0.03%

之 CO_2 , 在土壤中由於根及其他生物體之呼吸作用消耗 O_2 並產生 CO_2 , 因此, 土壤空氣中 CO_2 濃度約為大氣中之 10~100 倍, 而土壤中 O_2 濃度則較大氣中少。一般作物生長所適宜的土壤 O_2 含量約在 10~15% 之間。由於 O_2 及 CO_2 在大氣中及土壤中之分壓不同, 會引起大氣中之 O_2 向土壤中擴散, 而土壤中之 CO_2 向大氣中擴散⁽²⁾。

Gill 與 Miller 兩氏發現當土壤中 O_2 含量低於 10% 時, 根生長即告遲緩。據 Bertrand 與 Kobnke 兩氏之報告, 限制玉米根系生長之臨界氧氣濃度約在 10% 左右⁽¹⁾。楊策群與林正鏘兩氏於民國 64 年曾指出, 臺灣之砂頁岩沖積土經豪雨後, 深度在 20~25cm 處之土壤氧氣濃度可降至 10% 左右, 而 30~40cm 處之土壤氧氣濃度可降至 6% 以下, 無論在旱季或雨季, 土壤氧氣濃度皆與玉米生長有顯著之相關⁽⁹⁾。許義祥、楊策群、楊尙仁等氏亦於民國 67 年指出甘蔗生長率與土壤氧氣濃度變化一致, 且呈線性關係⁽¹⁰⁾。

至於土壤空氣之交換, 係由擴散與氣象因素而發生。例如: 土壤中溫度的變化、氣壓之變化、風之作用、雨水之影響等。土壤中加水後會引起擴散率與孔隙度間之關係: $D = KS^3$

式中 D : 擴散常數

K : 擴散係數 (2.16×10^{-4})

S : 自由孔隙

孔隙增加一倍時, 擴散速率可增加四倍。Penman 氏謂, 通過多孔物質 (如土壤) 之氣體擴散率低於通過自由孔隙中者, 其原因之一為氣體分子係在較狹小的橫斷面積上 (孔隙之斷面積) 運動, 另一原因為氣體分子所通過的通路為彎曲且狹長的通路。因之, 理論上通過土壤而達於平衡狀態之擴散率可以下式表之:

$$\frac{d_q}{d_t} = \frac{D}{b} A \frac{P_1 - P_2}{l}$$

式中 $\frac{d_q}{d_t}$: 擴散率

D : 擴散常數

b : 比例常數

A : 土壤之橫斷面積

P_1, P_2 : 土壤 l 長度兩邊之氣體分壓

l : 土壤之長度

若考慮擴散之有效橫斷面積與分子通行之有效通路長度, 則可成立如下公式:

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{D_0}{b} = AS \frac{P_1 - P_2}{l_0}$$

式中 D_0 ：空氣中之擴散係數

S ：孔隙或有效之橫斷面積

l_0 ：通過土壤之有效通路長度

綜合以上兩式可得

$$D = D_0 S \frac{l}{l_0}$$

由以上之理論，可知影響空氣之擴散作用最顯著之因素為土壤之孔隙（結構）、土層之深度等⁽¹⁾。而此土壤之孔隙乃指土壤中容納氣體之孔隙，而非全孔隙。因為氧氣在水中之擴散速率比在充滿空氣的空間之擴散速率約慢 10,000 倍。實驗顯示，當土壤中 O_2 擴散速率小於 $20 \times 10^{-8} \text{ g/cm}^2/\text{min}$ 時，許多植物之根部常會發生缺 O_2 現象，而使植株死亡⁽²⁾。因之，如果土壤表層孔隙大而底層堅硬，則底層之空氣不易與大氣之空氣交換；如果土壤密實而雖然底層孔隙大，仍然會引起通氣不良之狀態。故要空氣之交換良好，必需有良好的土壤結構。Renk 氏發現孔隙大小對土壤空氣擴散率最為重要，他比較不同質地土壤之擴散率中，發現當粗砂之孔隙為 37.9%，細砂為 5.55% 時，粗砂之空氣擴散率為細砂之 1,000 倍，可知粗砂之粗大孔隙對空氣運動發生很大的效果。Wollny 氏亦表示粒團構造之壤土，其空氣擴散速率為粉狀構造（粒徑小於 0.25mm）壤土之 50~100 倍。砂粒與腐植土含有多量粗大孔隙，故有巨大的非毛細管孔隙。而多數砂質土壤有過度的通氣性，因之，常失去適當的水分保持能力。反之，粘土常有較低的空氣保持力，故在粘土中欲使作物發育良好，則充分的通氣為一重要課題⁽¹⁾。

(3) 土壤水分

Briggs 氏將土壤水份分為三類：吸着水、毛細管水、重力水，其中植物能吸收利用者為毛細管水。Bouyoucos 氏亦分為三類：重力水、自由水、不自由水（包括毛細管水、結合水），其中自由水為在 -1.5°C 下結冰，可供植物利用之水份⁽¹⁾。

若土壤中之水份含量不足，則作物不但不能利用養分，且不能維持其正常之生理機能。若土壤中含有過量之水份或不足之空氣（氧氣），則作物亦不能有效地利用土壤中之養分^(1,2)。

土壤中之水份流動情形與結構土壤、水份張力

、孔隙大小都有關係。例如心土層中水份須通過裂隙及龜裂處，或老根遺留之小孔道，或蟲穴等後才能在該層中作有效的流動。若心土層之透水性差，則灌溉後或下大雨後，過剩的土壤水份保留在心土層以上之時間勢必延長，如果水份太多而使根之生長點浸在水中過久，則生長點易停止生長甚或腐爛，輕則作物生長停滯一段時期，重則作物死亡。又土壤經長時間耕作而壓實後，土壤容積密度增加，使全孔隙度減小，水份在土壤中運動之阻力即增大，因之，滲透率及土壤飽和導水率可因容積密度之增高而下降，使旱季時之灌溉效率減低，根系難以獲得足夠之有效水份；雨季時，土壤內部排水速率甚低，勢必造成嚴重通氣不良現象，當坡度太大時，地面逕流水可冲刷表土，而形成水土流失問題。故土壤之排水性能必須良好，才能利於作物根系之發育⁽¹⁾。噴氣式深耕機乃能使心土層破壞，產生孔隙，增大透水性，減輕土壤壓實現象，並利於排水^(15,16,17)。

(4) 機械阻力

影響根系延伸的另一項因素為機械阻力。早在 1948 年，Veihmeyer 與 Hendrickson 二氏即強調機械阻力為限制根生長之主要因素，彼等認為粘土之容積密度在 1.60g/cm^3 以上時，根系延伸即受限制⁽¹⁾。臺糖研究所薛鎮江氏分別以砂壤土及重粘土研究蔗田土壤密度對甘蔗生長之影響，發現限制甘蔗根系伸長之臨界密度約在 $1.5\sim 1.7\text{g/cm}^3$ 之間⁽¹²⁾。Barley 等氏亦有相同的結果發表。Monteith 與 Banath 二氏以壤土及粘壤土壓成不同容積密度之土柱而後測定甘蔗根系貫穿情形，發現當密度自 1.35 升高至 1.73g/cm^3 以上時，貫穿阻力即 0.70 自增至 4.5g/cm^2 以上，根量則依密度及貫穿阻力之增加而減少，當密度為 1.73g/cm^3 時，根之伸長即完全受阻，根之伸長量與貫穿阻力間達 1% 極顯著水準⁽¹⁾。又根據臺糖研究所楊尚仁等氏在岸內試區所做田間實測結果顯示，容積密度及貫穿阻力均隨機械壓次數之增加而增高，當壓次數達六次後，表土之容積密度已高於 1.70g/cm^3 ，貫穿阻力亦在 4.5g/cm^2 以上。當根系分佈之深度及密度減少後，土壤中水份及養分之有效性亦告減低；又因土壤容積密度增高後，水份及養分進入根部及在植物組織中運動之阻力隨之增加，故水份及養分吸收之能力亦告降低，最後使地上部發育減緩，產量降低⁽⁸⁾。以楊尚仁等氏在岸內

試區所得結果而言，若 0~40cm 深度土層平均容積密度自 1.55g/cm³ 增至 1.70g/cm³ 時，蔗產量自 70 ton/hac 降至 27ton/hac，每增高容積密度 0.1g/cm³，宿根產量即減低 26.5ton/hac，其減產幅度之大，恐非其他任何土壤因素可與比擬。

2. 土壤化學性

土壤化學性，一般指土壤酸度 (PH 值)、土壤養分 (氮、磷、鉀三要素所構成)、及其他元素含量及其有效性而言。

根據 Rhanna 氏在印度研究發現，適合蔗根生長之土壤 pH 值在 6.1 至 7.7 之間，一般作物也大約在此酸度範圍 (中性 pH=7) 左右；而土壤養分含量多者，作物根羣往往生長比較旺盛。土壤酸度及養分含量對根系之生育，常因土壤物理性、化學性或有機肥料及土壤中劑之施用而有不同之效應。土壤酸度影響土壤中各種元素之可溶性，且化學肥料、有機肥料或土壤中劑之施用，亦可改變土壤酸度^(1,2)。因此，探討以噴氣式深耕機兼具地下施肥功用，以確保或求得適合於作物生長的酸度、肥份等，當屬可行之方法。

3. 土壤生物性

土壤中存在有病毒、真菌及線蟲等地下生物，常對作物根羣造成嚴重之傷害，輕則作物生長受阻，重則作物枯死，而影響作物之總產量。土壤中之生物羣，雖然對有機質肥料及植物殘體的分解即土壤中養分之有效化有所助益，但若土壤中有害生物羣密度過高，更影響作物之正常生長。土壤長期浸水，雖然可使大部份地下害蟲窒息而死，但常造成根羣之腐爛，此乃根系受某種生物如真菌、細菌或病毒之入侵所致^(1,2)。因此，適當地調和土壤生物密度，減少土壤中生物羣之為害，益顯重要。噴氣式深耕機可經若干改良後兼具地下噴藥病蟲害防治之效果，以調和土壤生物密度，使其最適於作物之生長。

4. 耕耘與土壤物理性

耕耘係為處理土壤之各種機械操作，藉之可鬆寬土壤，使成為適宜的狀態，而有利於作物根羣之發育。犁耕主要是先翻轉土壤表層而將其置於下部，然後將亞表土層 (已經過植物根作用形成團粒構造者) 移至表面，亦即改變土壤結構。心土犁可將堅實之心土疏鬆，加深根部之發育範圍，而提高作物之產量⁽¹⁾。

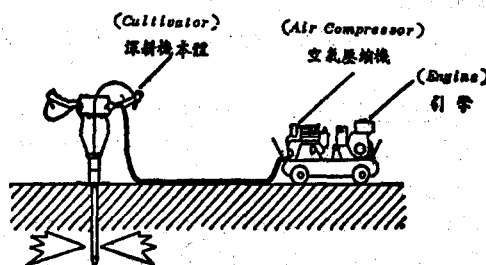
作物種植後必需實行中耕，中耕之目的主要為

改良土壤物理性；給予作物以通氣良好及適宜的根床；保持水份以應付乾旱；促進土壤質地產生不同程度之疏鬆，亦即增加土壤粗大之孔隙度⁽¹⁾。中耕之深度依土層密實情形及作物根系特性而定，深根性作物需作深層中耕，淺根性作物若作深層中耕亦可促進排水，避免雨水浸蝕之危害。本省目前一般所使用之中耕方法為以人力，利用鋤頭或以小型中耕機驅動迴轉式中耕爪而實施中耕作業；此等方法為犁翻土壤之方式，作業深度有限 (一般約在 20 cm 以內)。另外噴氣式深耕機為在土壤深層噴入高壓空氣以鬆動土壤之深耕法，不同於傳統之機械犁耕法。噴氣式深耕機在日本及本省之實施情形敘述於后。

(二) 噴氣式深耕機及其試驗

1. 噴氣式深耕機簡介

噴氣式深耕機包含引擎、空氣壓縮機與深耕機本體等三大部份，如圖一所示。它是利用引擎之動力驅動空氣壓縮機，產生高壓之空氣，經高壓軟管輸送至深耕機本體，再將深耕機本體之圓形噴管打入土壤深層 (最深為 45cm)，然後控制高壓空氣充放閥，使高壓空氣 (約 10kg/cm²) 於瞬間噴入土壤深層，令土壤鬆動，以達深層中耕之作業。



圖一、噴氣式深耕機整套設備

Fig 1. The systems of the pneumatic cultivator

此機械若操作良好，具有下列優點：

- (1) 令土壤結構產生變化，增加土壤孔隙。
- (2) 提高大氣與土壤內空氣之交換程度，增加作物所需之 O₂，排除多餘之 CO₂。
- (3) 土壤鬆動後，促進土壤微生物之生長繁殖，增加土壤有機質之含量。
- (4) 土壤鬆動後，有利於作物根系的發育，提高根系吸收養分、水分之能力，促進作物之生長，增加其產量。
- (5) 底層堅硬之土壤經鬆動後，可提高排水效果

。

2. 噴氣式深耕機在日本之試驗情形

本機於 1976 年由日本岩谷產業株式會社出廠，取名為「壓搾空氣式心土破碎機」，或「パンダ」深耕機」。本機在日本之試驗情形如下：

(1) 愛媛大學農學部助教授川崎一男博士指出⁽¹⁴⁾

(i) 噴氣式深耕機可促進排水作用。

(ii) 排水作用良好之土壤，其作物（葡萄）之產量較高，果實較肥大。

(iii) 土壤中 O_2 濃度在 10~20% 對作物最適宜，而噴氣式深耕機可促進土壤孔隙度之增加， O_2 濃度之提高。

(2) 島根縣農業試驗場之實驗⁽¹⁵⁾指出

(i) 噴氣過後土壤之排水情形良好。

(ii) 土壤被鬆動之範圍為距噴氣點中心，半徑為 90cm 之區域內。土壤鬆動後，注入石灰水 17~18 ℓ ，則其分佈之範圍為以噴氣點為中心半徑約 30~50cm 之區域。

(iii) 噴氣處理區土壤硬度較未處理區為小。

(iv) 三相分佈情形，噴氣處理區之氣相所占 % (約 9~20%) 比未處理區 (約 6~7%) 為大，表示孔隙增大。

(v) 噴氣處理區作物產量較高，果實較肥大。

。

(3) 農業生產工學研究會⁽¹⁶⁾指出

(i) 噴氣處理對蔬菜（胡瓜）與果樹（葡萄）均可增加其產量。

(ii) 噴氣處理區土壤內之氣相所占 % 比未處理區高，但隨時間其 % 亦會逐漸降低。例如處理後氣相占 10~13%，經過 68 日後占 3~5%。

(iii) 噴氣處理區之土壤，其通氣性 (μ^2) 與透水性 (cm/sec) 均優於未處理區。

3. 噴氣式深耕機在本省之試驗情形

本省於民國 70 年由廠商引進噴氣式深耕機，先後在東勢及二林等農會舉辦操作示範，並已通過農機性能檢定，推廣給農民使用。鑑於噴氣式深耕機在日本之試驗，偏重於作物產量及其生長性狀之調查，對於土壤物理性之測定較少，因之，與大農機系在民國 71 年，由農機基金會之經費補助下，購買一部噴氣式深耕機，進行田間及基本試驗，茲扼要敘述已作實驗之結果如下^(4,5,6)：

(1) 噴氣式深耕區之土壤結構受到破壞，土壤貫

穿阻力較未處理區為小，貫穿阻力測定器能貫入之深度也較深。

(2) 噴氣與否對土壤孔隙度之關係，於甘藍試區內，在 25% 顯著水準下有明顯地差異，於芒果及葡萄試區內，在 10% 顯著水準下有明顯地差異，於高粱試區內，則無明顯地差異。

(3) 噴氣與否對產量之關係，於甘藍試區內，在 5% 顯著水準下有明顯地差異，在高粱試區內則無明顯地差異。

(4) 由土槽及田間基本試驗之土壤孔隙度、貫穿阻力等資料顯示，噴氣深耕機之最大作業範圍是距噴氣點中心半徑為 80cm 之區域內。

(5) 噴氣式深耕機經改良，加裝液體輸入裝置及液體貯存裝置，可以將液態肥料或藥液噴入土壤中，不但具有深耕、促進排水之功用，且可兼具地下施肥及病蟲害防治等多用途，且此機構之改良已獲中央標準局新型專利十年⁽⁷⁾。

筆者認為此種噴氣式深耕法是一種突破傳統犁耕之中耕方式，具有高度之挑戰性。如何使此種深耕法變為實用階段，則不但要進行作物之田間試驗、更須進行基本試驗，以決定各種作物之最佳作業條件，使此機械具有最高之利用價值。

三、材料與方法

(一) 試驗材料與儀器設備

1. 材料：土壤、土壤取樣皿、大玻璃杯、1000 ml 量筒、圓鋤、鋤頭、捲尺、#5 號鐵絲網、葡萄（砧木品種，三年生）。

2. 儀器設備

(1) 噴氣式深耕機整套設備（如圖一所示）。

岩谷牌深耕機，汽油引擎 GEDBS-2 型，3.5ps，小型空氣壓縮機 BC-2 型，深耕機本體貯氣箱容量為 2.2 ℓ ，噴氣壓力為 10kg/cm²，打入地下最深為 45cm。

(2) 天平：OHAUS 槓桿式微動天平，靈敏度為 $\pm 0.1g$ ，容量為 2610g。

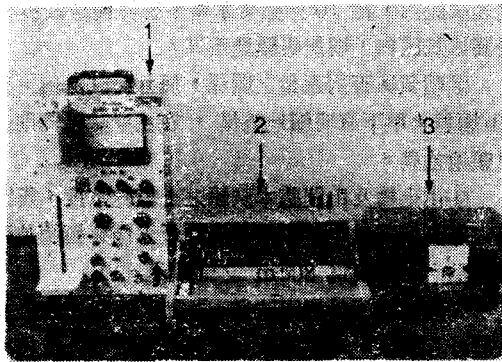
(3) 烘箱：中部電機公司 R80 型，溫度範圍為 0~350°C，250Volt，2.5kw，11Amp。

(4) 萬能物性測定器 (Rheometer) (如圖二所示)。FUDOH NRM-2020J-cw 型，負荷界限為 0~2kg 及 0~20kg 兩種，可測拉力、壓縮、剪力、及負荷鬆弛等。

(5) X-Y 記錄器 (X-Y Recorder) (如圖二

所示)。FUDOH NP-0473A 型，可記錄剪力與時間之關係，紙帶行走速度為 2~120cm/sec。

(6)穩壓器(如圖二所示)：YH-80 型，電壓範圍為 0~150 volt，它可穩定輸出之電壓。



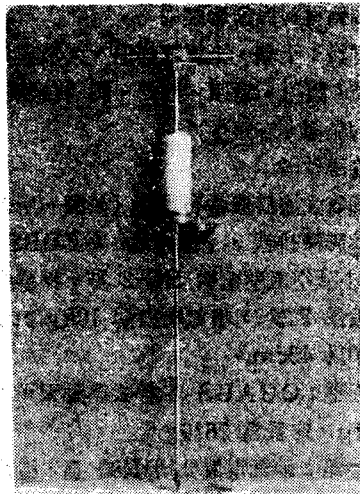
圖二、根剪力測定裝置

其中 1.萬能物性測定器 2.X-Y 記錄器
3.穩壓器

Fig 2. Instruments for measuring roots shearing force.

1. Rheometer 2. X-Y Recorder
3. Steady voltage meter.

(7)土壤貫穿阻力測定器 (Soil penetrator)
(如圖三所示)可測定土壤之貫穿阻力、抗剪力等，貫入深度最深可達 1m。



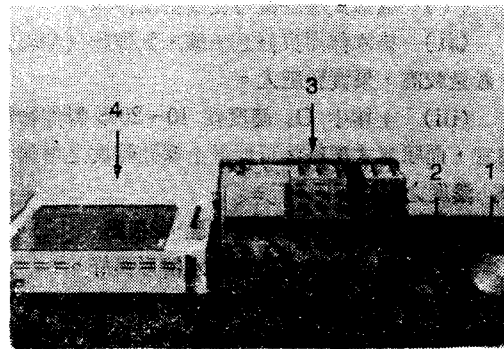
圖三、土壤貫穿阻力測定器

Fig 3. Soil penetrator.

(8)土壤壓力測定器 (Soil pressure sensor)
(如圖四所示) KD-10D 型，容量為 10kg/cm²，圓盤外徑 10cm，可感應之直徑為 7.8cm。

(9)動應變放大器 (Dynamic strain amplifier) (如圖四所示) KYOWA DPM-3E6B 型，可同時放大 6 個信號。

(10)動應變記錄器 (Direct recording oscillograph) (如圖四所示) RAPET RMS-200H 型，可同時記錄 18 點。紙帶速度分為 1, 2, 10, 20 cm/sec 四種。



圖四、土壤噴氣試驗測定裝置

1.壓力測定器 2.電橋盒 3.動應變放大器
4.動應變記錄器

Fig 4. Instruments for measuring soil force impacted by high-pressure air.

1. Soil pressure sensor.
2. Bridge box.
3. Dynamic strain amplifier
4. Direct recording oscillograph.

(11)攪拌器 (Mixer)：用以高速迴轉 (16000 rpm) 攪拌土壤溶液，作土壤機械分析時用之。

(12)比重計：Bouyoucos Scale ASTM 152H，刻度從 0~60。

(一)測定項目

1.土壤含水率之測定

以土樣取樣皿在欲測定含水率之土壤取樣之，立即以天平秤重，然後放入烘箱內，以 110°C 烘乾 24 小時，再稱重，則可求得土壤之含水率 M.C. (%)，其計算公式如下：

$$\begin{aligned} \text{M.C.}(\%) &= \frac{W_w}{W} \times 100\% \\ &= \frac{\text{乾燥時移去之水份重量}}{\text{乾燥前土壤重量}} \times 100\% \end{aligned}$$

2.土壤機械分析 (液體比重計法)

以乾燥之土壤 50 g 放入大玻璃杯中，加水 200ml，再加入分散劑 20ml，然後以攪拌器攪拌之，5~10 分鐘後倒入 1000ml 量筒內，加蒸餾

水至 1130ml，將比重計放入，待 40 秒後，讀出比重計讀數，同時記錄溫度（標準溫度以 19.4°C 為準，每增減 1°C 則比重計之讀數須增減 0.3 刻度）。2 小時及 7 小時時亦讀出其讀數及溫度，可按下列公式求得砂粒、粉粒及粘粒之百分比，再查土壤質地分組三角形圖，即可求得此種土壤之質地。

$$\text{砂粒}\% = 100 - \frac{P_s}{W} \times 100$$

$$\text{粘粒}\% = \frac{P_c}{W} \times 100$$

$$\text{粉粒}\% = 100\% - \text{砂粒}\% - \text{粘粒}\%$$

其中 P_s ：40 秒後之比重計讀數

P_c ：2 小時後之比重計讀數

W ：烘乾之土壤重，50g

3. 土壤貫穿阻力之測定

以圓錐形土壤貫穿阻力測定器（cone soil penetrator）在欲測定之土壤上徐徐往下壓，則貫入阻力與貫入深度之關係可以線圖同時表示在測定器上。

4. 葡萄根之抗剪力測定

將萬能物性測定器與穩壓器及 X-Y 記錄器等，以正確之方法連接，控制電壓為 100 volt，先將儀器歸零。選用測定剪力之附屬配件裝在測定器上，將欲測定之根放於測定平台上，控制平台以緩慢之速度移動，使根接受剪切，則剪切根所需之力量，可以顯示在 Rheometer 上，同時亦可以線圖記錄在 X-Y Recorder 上。

5. 土槽噴氣作用力之測定

將土壤壓力測定器（內裝有應變規（strain-gage）以感應力量之變化）接至 Wheastone 電橋盒，測定器所感應之力量，將轉化為電阻之信號，再接至動應變放大器，於此將信號放大，最後接至記錄器上，可將此作用力以線圖描繪在記錄器上。再經過校正，即可求出測定器所感應之作用力大小。

（三）試驗方法與步驟

1. 葡萄根抗剪力之測定

（1）於 1983 年 9 月至農試所園藝系農場，選擇三年生砧木品種之葡萄，進行根之挖掘工作。

（2）將挖好完整之根羣帶回與大農機系，以萬能物性測定器與 X-Y 記錄器等進行根抗剪力之測定。

（3）每條根每隔 2cm 之距離，測其直徑（取三次之平均值）及抗剪力等，並記錄之。

（4）將所得之資料輸入中興大學電子計算機中心之電腦中，使用 BMDP 1R Package，求根之抗剪力與根直徑、根距植株距離等之關係。

2. 土槽噴氣試驗

（1）於 1983 年 9 月，在中興大學農機系，以 #5 號鐵絲網圍成直徑 160cm，高 60cm 之土槽。

（2）將土槽逐漸填充土壤，每填充 5cm 時，以人及木樁壓實，壓實之標準為以小型土壤貫入器貫穿一定深度時之阻力相同為其標準，以期土槽每次試驗之土壤條件能均一，壓實之土槽高度為 60cm。

（3）填充土壤之同時，按所須測定之位置埋設土壤壓力測定器。設計之位置為半徑方向取 8 點（10, 20, ~80cm），深度方向取 5 點（10, 20, ~50cm），以求取在不同半徑與不同深度下之土壤承受作用力。

（4）土槽作好後先灌水，待其乾後再測定之。

（5）測定時，每次試驗之土槽均以相同噴氣條件處理之，第一次噴氣，其噴氣點距離土壤表面 25 cm 深，第二次 45cm 深。每次噴氣時均須校正動應變放大器。當噴氣時，土壓器所感應之力量就會在記錄器上以線圖顯示之。使用動應變放大器之 $ATT=1/3$ ，cal 為 300×10^{-6} ，記錄器之紙帶行走速度為 10 cm/sec。

（6）每次試驗後均隨機抽樣測其含水率。

（7）試驗前抽樣測定土槽之土壤貫穿阻力，噴氣後在不同半徑下再測定之，比較貫穿阻力之變化情形並分析之。

（8）取土樣作機械分析，以瞭解土壤之質地。

（9）使用 BMDP 1R 分析土槽噴氣時其土壤反作用力與作用半徑、土壤深度等關係，並繪出高壓空氣運動的路徑。

四、結果與討論

（一）葡萄根羣抗剪力之分析

1. 本試驗選用之葡萄為三年生之砧木品種，其根羣分佈如圖五所示。

2. 將葡萄根系之測定資料，以 BMDP 1R 求出下列之迴歸關係：

$$Y = 3.7996 - 0.004X_1 \quad (1)$$

$$r = 0.8853, \quad r^2 = 0.7837$$



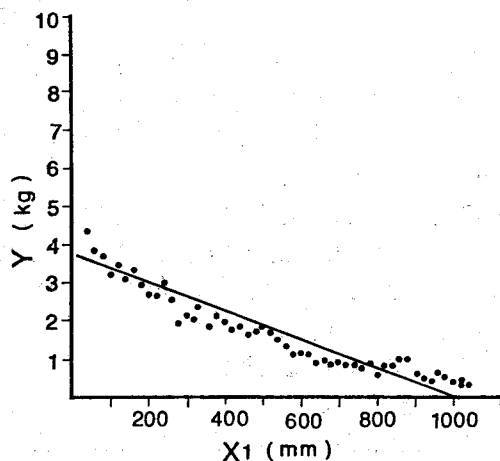
圖五、葡萄根羣分佈情形

Fig 5. The distribution of the grape roots.

其中 Y = 根之抗剪力, kg

X_1 = 根距植株之距離, mm

上式表示葡萄根之抗剪力與根距植株距離成反比, 亦可以圖六表示之。



圖六、根之抗剪力 (Y) 與距植株距離 (X_1) 之關係。

Fig 6. The relationship between shearing force (Y) and distance from grape trunk (X_1) of grape roots.

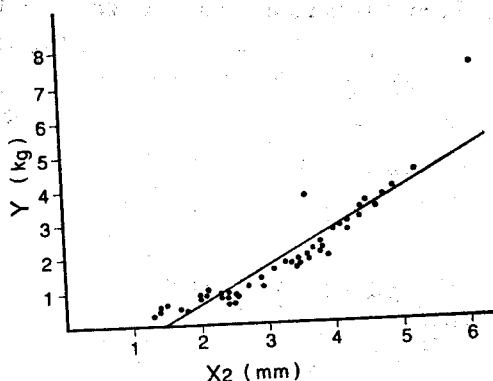
在葡萄根羣分佈之區域內, 只要知道根之任一點距植株之距離 (X_1), 即可依 (1) 式求得在此點處之葡萄根所能承受之最大剪切力量 (Y)。同理, 若設定葡萄根之抗剪力, 亦可依 (1) 式求得在此抗剪力下之根, 其距植株之距離。

葡萄根之抗剪力與其根直徑之關係亦可以下之迴歸關係表示之:

$$Y = -1.6366 + 1.093X_2 \quad (2)$$

$$r = 0.9266, \quad r^2 = 0.8586$$

(2) 式亦可繪成七圖之關係。



圖七、根之抗剪力 (Y) 與根直徑 (X_2) 之關係。

Fig 7. The relationship [between shearing force (Y) and diameter (X_2) of grape roots.

(2) 式表示根之抗剪力與其直徑成正比。只要知道根之直徑 (X_2), 即可依 (2) 式求得此根能承受之最大剪切力量 (Y)。同理, 若知道 Y , 亦可求得 X_2 。

綜合 Y , X_1 , X_2 等關係, 亦可得如下之複相關迴歸方程式:

$$Y = -4.9694 + 0.004X_1 + 1.872X_2 - 0.001X_1X_2 \quad (3)$$

$$r = 0.9836, \quad r^2 = 0.9676$$

應用 (3) 式時, 必須在 Y , X_1 , X_2 三項中已知兩項, 才能求得第三項。如果 X_1 , X_2 中有一未知而必須求 Y 時, 則應利用 (1) 或 (2) 式以求 Y 。此三個迴歸方程式適合於砧木品種三年生之葡萄根羣, 對於決定此品種之最佳噴氣作業條件有很密切之關係, 後面將舉例說明之。

(二) 土槽噴氣試驗

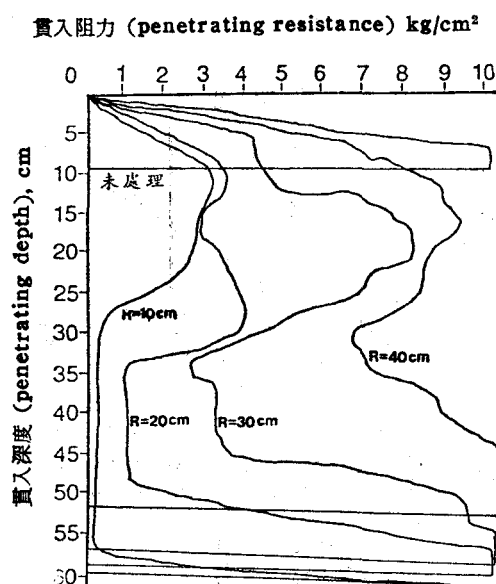
1. 土壤機械分析及含水率之測定

土壤經過機械分析, 其粘粒占 20.76%, 粉粒占 51.90%, 砂粒占 27.34%, 查土壤質地分組三角形圖, 得知土槽試驗之土壤質地為粉質壤土 (silt loam)。

土壤含水率經過八次土槽試驗之測定 (每次測定 10 個樣本), 其平均含水率為 9.26%, 其高低間之差別很小, 故可視為土壤含水率對噴氣試驗之影響效果相同。

2. 土壤貫穿阻力線圖

噴氣處理前後, 土槽之貫穿阻力測定線圖如圖八、圖九所示。



圖八、未噴氣處理與噴氣處理後之土壤貫穿阻力線圖

Fig 8. The soil penetrating resistance diagram of soil bin.

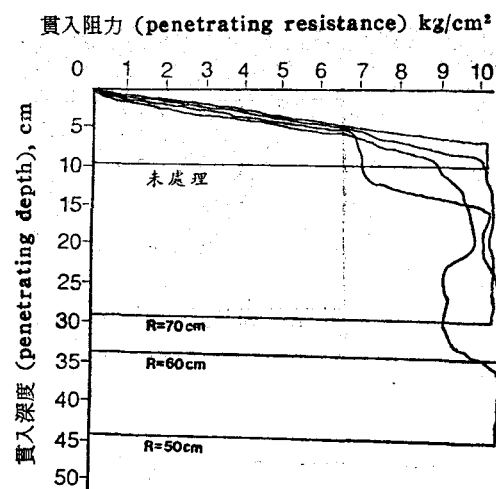
由實測之土壤貫穿阻力線圖得知如下之關係：

(1)未作噴氣處理時之土槽，土壤貫穿阻力測定器能貫入之深度約僅 9cm，當貫入 7cm 時已達 10kg/cm^2 之阻力。此種現象與實際田間土壤之測定結果相類似，亦可表示土槽之製作嚴謹，已模擬實際之田間狀況。可參考文獻 5。

(2)噴氣處理後，距噴氣點不同半徑下之土壤貫入阻力以及貫入深度有顯著的不同，其貫入阻力與貫入深度之連續關係已表現於圖八與圖九中。

(3)以 $5R=20\text{cm}$ 為例說明此種線圖所代表之含意。

當土壤貫穿阻力測定器逐漸往下壓時，其貫入



圖九、未噴氣處理與噴氣處理後之土壤貫穿阻力線圖

Fig 9. The soil penetrating resistance diagram of soil bin.

深度與貫入阻力成正比的增加，可是當深度達 12~20cm 時，阻力反而減少，此種現象表示在此深度範圍之土壤受到噴氣之破壞，較為疏鬆，所以測定器所測定之阻力有減少之現象。深度達 20cm 以上時，阻力繼續增加，其阻力之大小可直接在線圖中查得，當深度達 30~50cm 時，其阻力又大量減少，表示在此深度範圍之土壤受破壞嚴重。50cm 以後阻力呈直線增加，直至 55cm 時已達 10kg/cm^2 。故在 $R=20\text{cm}$ 處之土壤，有兩處受到破壞，一處為深度 12~20cm，另一處為深度 30~50cm 之範圍。

(4)將不同半徑下，土壤貫穿阻力線圖中，其貫入阻力有顯著減少之深度範圍列出，如表一、表二所示。

表一、噴氣深度為 25cm 時，在不同半徑下，其貫入阻力有顯著減少之深度範圍。

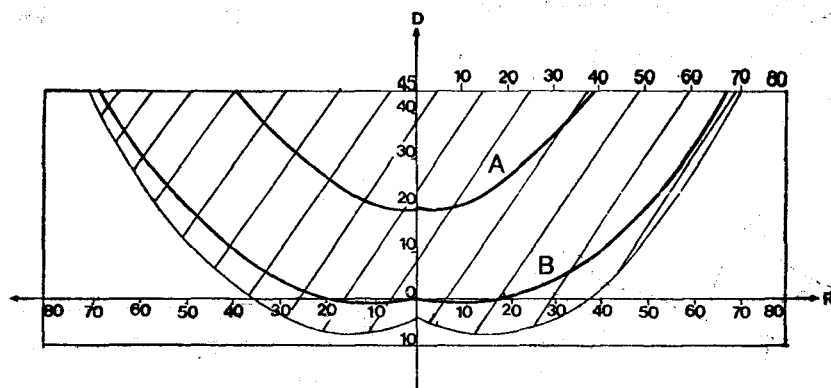
Table 1. Depth range where the penetrating resistance has reduced apparently in different radius, the injection point is 25cm in depth.

半徑 (Radius) cm	10	20	30	40	50
深度範圍 (Depth range) cm		12~20	5~12	—	—
深度平均值 (Average depth) cm	25	16	9	—	—

表二、噴氣深度為 45cm 時，在不同半徑下，其貫入阻力有顯著減少之深度範圍。

Table 2. Depth range where the penetrating resistance has reduced apparently in different radius, the injection point is 45cm in depth.

半徑 (Radius), cm	10	20	30	40	50	60	70	80
深度範圍 (Depth range), cm	25~55	32~52	35~45	30~35	23~33	5~13	—	—
深度平均值 (Average depth), cm	45	42	40	33	23	9	—	—



圖十、土槽中高壓空氣之運動路徑 (曲線A與B)

Fig 10. The path (curves A and B) of high-pressure air which moves in the soil bin.

若依表一、表二之資料，取深度平均值，可繪出土槽內高壓空氣噴出後之運動路徑，如圖十所示。

圖十中曲線 A 為距土壤表面 25cm 噴氣時，高壓空氣之運動路徑。曲線 B 為 45cm 深噴氣時高壓空氣之運動路徑。若以 45cm 深之噴氣點設為原點 (如圖十所示)，用表二之深度與半徑之關係，可建立高壓空氣運動路徑之迴歸方程式：

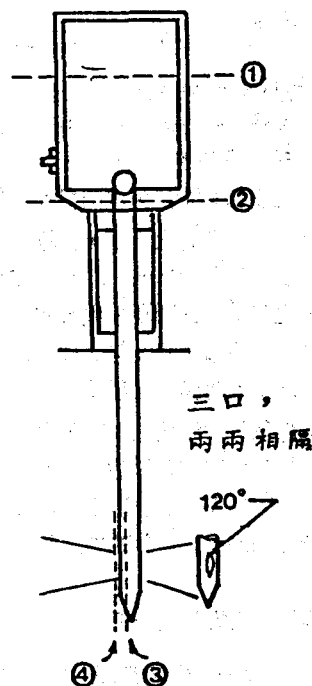
$$D = 1.0952 - 0.282R + 0.014R^2 \quad (4)$$

$$r = 0.9849, \quad r^2 = 0.9701$$

本試驗中之噴氣深度為 45cm，故其高壓空氣運動之半徑可依(4)式求得 $R = 68\text{cm}$ ，實際上經由貫穿阻力之測定，在圖十之陰影部份為噴氣深耕後能有效改善土壤物理性之區域，而其半徑約為 70 cm。圖十以及 (4) 式可作為噴氣作業之重要參考資料。

3. 土槽噴氣時之空氣動力學分析

噴氣式深耕機其噴氣深耕之原理是利用高壓空氣於瞬間釋放而鬆動土壤，參考圖十一，壓縮空氣 (10kg/cm²) 在儲氣箱①內，經由球形閥所控制之孔口 (orifice)②，通過 60cm 長之噴管，而於噴管出口③噴至外界土壤④中。按空氣壓縮系統特性知，摩擦效應及熱傳損失皆可忽略不計，故由熱力學理論，此一真實氣體之流程可以等熵流 (isentropic flow)，即無摩擦之絕熱過程 (frictionless adiabatic process) 描述之。此空氣之流動情形必需以空氣動力學解析之，茲將圖十一繪成空氣動力學之收斂——發散型噴嘴模型以便於分析，如圖十二所示。



圖十一、深耕機本體之四個關鍵位置 (①~④)

Fig 11. The key point in the cultivator.

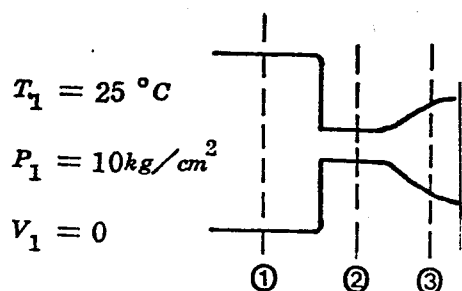
符號說明：

*：參考狀態 (Reference state)，此處係以等熵流作為參考狀態。

M：馬赫數 (Mach number)

t：靜滯狀態 (Static stagnation state)。

γ ：物質其等壓比熱與等容比熱之比值，即 $\gamma = C_p/C_v$ ，空氣之 γ 值為 1.4。



圖十二、收斂——發散型噴嘴

Fig 12. Converging-diverging nozzle.

g_c : 因次比例常數, 或稱牛頓常數。

英制 $g_c = 32.174 \text{ ft} \cdot \text{lb}_m / \text{lb}_f \cdot \text{sec}^2$

公制 $g_c = 1 \text{ m} \cdot \text{kg} / \text{nt} \cdot \text{sec}^2$

R : 氣體常數, 空氣之 $R = 286.997 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{K}$

A : 截面積, 公制為 m^2

$$\begin{aligned} \frac{A_3}{A_3^*} &= \frac{A_3}{A_2} \times \frac{A_2}{A_2^*} \times \frac{A_2^*}{A_3^*} \\ &= \left(\frac{\frac{\pi (1.52)(1.0)}{4} \times 3}{\frac{\pi (1.62)^2}{4}} \right) \quad (1) \quad (1) \\ &= (1.781)(1)(1) \\ &= 1.781 \end{aligned}$$

其中: $M_2 = 1$,

$$\begin{aligned} A_3^* &= A_2^* \left(\text{因等熵操作及 } \frac{A_3^*}{A_2^*} = \frac{\Delta S}{e} \right) \\ A_2 &= A_2^* \end{aligned}$$

在②處之噴管內徑為 1.62cm, 在③處之噴管口徑為近似橢圓, 其長邊為 1.52cm, 短邊為 1cm。

由公式

$$\frac{T_2}{T_{12}} = \frac{1}{1 + \frac{1.4-1}{2} M_2^2} \quad (5)$$

$$\therefore \frac{T_2}{T_{12}} = \frac{1}{1 + \frac{1.4-1}{2} \times 1^2} = 0.833$$

$$\begin{aligned} \therefore T_2 &= T_{12}(0.833) = (273 + 25)(0.833) \\ &= 248.234^\circ\text{K} = -24.766^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$\text{定義: } V_2 = M_2 a_2 = \sqrt{r \cdot g_c \cdot R \cdot T_2} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \therefore V_2 &= \sqrt{1.4 \times 1 \times 286.997 \times 248.234} \\ &= 315.815 \text{ m/sec} \end{aligned}$$

$$\text{公式: } \frac{P_2}{P_{12}} = \left(\frac{1}{1 + \frac{r-1}{2} M_2^2} \right)^{\frac{r}{r-1}} \quad (7)$$

T : 溫度, 公制為 $^\circ\text{K}$

P : 壓力, 公制為 $\text{PP}_a(\text{nt/m}^2)$, 國際標準制為 kg/cm^2

V : 速度, 公制為 m/sec

若馬赫數 $M > 1$ 則為超音速 (Supersonic)

$M = 1$, 則為音速 (Sonic), $M < 1$ 則為次音速

(subsonic)。由等熵流之特性知, 噴嘴的喉管

(Throat) 處, 其 $M = 1$, 即空氣在喉管處之流

速為音速。由 V_2 及初速 V_1 知, ①~②過程為

次音速, 其 $M < 1$ 。至於②~③過程則可能為超音

速亦可能為次音速, 必需視③之後「環境」(Env-

ironment) 的壓力而定。若 $P_3 > P_2$ 則為次音速

, 若 $P_3 < P_2$ 則為超音速。而此「環境」, 在土槽

噴氣試驗中, 即指在噴管出口處之土壤貫穿阻力而

言, 今解析如下:

(1)圖十二孔口處②之狀態分析

$$\therefore \frac{P_2}{P_{12}} = \left(\frac{1}{1 + \frac{1.4-1}{2} \times 1^2} \right)^{1.4/1.4-1} = 0.528$$

因爲 $P_{11}=10\text{kg/cm}^2$, $P_{11}=P_{12}$

$$\text{且由公式 } P_2 = \frac{P_2}{P_{12}} \cdot \frac{P_{12}}{P_{11}} \cdot P_{11} \quad (8)$$

$$\therefore P_2 = (0.528)(1)(10) \\ = 5.28 \text{ kg/cm}^2$$

(2)圖十二噴出口處 ③之狀態分析

③處之總壓力

$$P_3 = \frac{F_3}{A_3} = \frac{\sum_{i=1}^3 F_{(i)}}{\sum_{i=1}^3 A_{(i)}} = \frac{3F_{(1)}}{3A_{(1)}} = P_{(1)}$$

其中 $i=1, 2, 3$ 分別表示第一、第二、第三噴口，故知任一噴口之壓力皆為 P_3 。

$$\text{公式: } \frac{A_2}{A_2^*} = \frac{M_2}{M_2^*} \left[\frac{1 + \frac{\gamma-1}{2} M_2^2}{1 + \frac{\gamma-1}{2} M_2^{*2}} \right]^{(\gamma+1)/2(\gamma-1)} \quad (9)$$

$$\text{已知 } \frac{A_2}{A_2^*} = 1.781, M_2 = 1, \gamma = 1.4, \text{ 代入(9)式,} \quad (9)$$

$$\text{可得 } 1.781 = \frac{1}{M_2} \left[\frac{1 + 0.2 M_2^2}{1 + 0.2} \right]^{2.4/0.8}$$

$$\therefore 1.781 M_2 = \left[\frac{1 + 0.2 M_2^2}{1.2} \right]^3 \quad (10)$$

上式可展開為六次方程式如下：

$$1 - 3.078 M_2 + 0.6 M_2^2 + 0.12 M_2^4 + 0.008 M_2^6 = 0$$

但實際上 M_2 只有兩個相異根（其餘皆為重根）。因之，利用 (10) 式及嘗試錯誤法 (trial and error method) 求得 $M_2 = 2.064$ 及 0.349 。茲分析此二相異根所代表之物理意義：

(i) $M_2 = 2.064$ ，表示②~③之過程為超音速狀態。

此現象在一般之田間土壤中不會發生，因為由土壤貫穿阻力線圖中顯示，噴氣處理前土壤貫穿阻力在地表下 7~10cm 時即已達 10 kg/cm^2 ，顯然此外界「環境」之壓力大於 P_2 ，故不會發生超音速氣流。此 $M_2 = 2.064$ 之現象，為深耕機在空中噴氣或者當 $P_3 < P_2$ 之情況下所產生之情形。有關 $M_2 = 2.064$ 之進一步解析，請參考文獻 5。

(ii) $M_2 = 0.349$ ，表示②~③之過程為次音速狀態。

應用前述之 $\frac{A_2}{A_2^*} = 1.781$ 及 (5) (6) (7) 諸式，於等熵流操作時之次音速狀態，得

$$\begin{aligned} \frac{P_2}{P_{12}} &= \left(\frac{1}{1 + \frac{\gamma-1}{2} M_2^2} \right)^{\gamma/\gamma-1} \\ &= \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{1.4-1}{2} \right) (0.349)^2} \right)^{1.4/1.4-1} \\ &= 0.919 \end{aligned}$$

$$\therefore P_2 = \frac{P_2}{P_{12}} \cdot \frac{P_{12}}{P_{11}} \cdot \frac{P_{11}}{1} = (0.919)(1)(10) \\ = 9.19 \text{ kg/cm}^2$$

$$\frac{T_3}{T_{13}} = \frac{1}{1 + \frac{\lambda-1}{2} M_3^2} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1.4-1}{2}\right)(0.349)^2}$$

$$= 0.976$$

$$\therefore T_3 = \frac{T_3}{T_{13}} \cdot \frac{T_{13}}{T_{11}} \cdot T_{11} = (0.976)(1)(298)$$

$$= 290.85^\circ\text{K} = 17.85^\circ\text{C}$$

$$V_3 = M_3 \cdot a_3 = 0.349 \cdot \sqrt{\gamma \cdot g_c \cdot R \cdot T_3}$$

$$= (0.349) \sqrt{(1.4)(1)(286.997)(290.85)}$$

$$= 119.306 \text{ m/sec}$$

因此，噴氣式深耕機在土壤內之噴氣深耕作業，於噴管出口處其空氣壓力為 9.19 kg/cm^2 ，溫度為 17.85°C ，空氣速度為 119.306 m/sec 。

4. 土槽噴氣試驗其土壤反作用力之測定

由空氣動力學之分析，得知噴氣式深耕機在①及③處之狀態為

$$P_1 = 10 \text{ kg/cm}^2, \quad V_1 = 0$$

$$P_3 = 9.19 \text{ kg/cm}^2, \quad V_3 = 119.306 \text{ m/sec}$$

依噴氣式深耕機之特性，在噴管出口處其位能 (elevation energy) 及壓力能 (pressure energy) 可忽略不計，因此其能量為速度能 (velocity energy)，可表為

$$E = \frac{1}{2} m V^2 \quad (11)$$

當空氣運動時之動量 (momentum) 為

$$mV = \frac{2E}{V} \quad (12)$$

此動量相當於以 F 之力在瞬間 t 衝擊土壤之衝量 Ft ，

$$\text{故 } Ft = mV = \frac{2E}{V} \quad (13)$$

而其中之能量 E 亦相當於高壓空氣在儲氣箱中所具備之能量，即 $E = P\nu$

$$\therefore Ft = \frac{2P\nu}{V} \quad (14)$$

$$\therefore F = \frac{2P\nu}{tV} = \frac{2 \times 10 \text{ kg/cm}^2 \times 2.2 \times 10^3 \text{ cm}^3}{0.1 \text{ sec} \times 119 \text{ m/sec}}$$

$$= 36.97 \text{ kg} \div 37 \text{ kg}$$

其中： E = 高壓空氣所具備之能量， $\text{kg} \cdot \text{m}$

m = 高壓空氣之質量， kg

V = 高壓空氣於噴管出口之流速， m/sec ， $V = 119.306 \text{ m/sec}$

F = 高壓空氣噴射於土壤之作用力，亦即土壤之反作用力， kg ，（此處 $F = 37 \text{ kg}$ 表示於噴管出口處高壓空氣作用於土壤之力為 37 kg ）

t = 高壓空氣噴射於土壤之時間， sec 。

（此處之時間可由 $t = \frac{\text{噴氣曲線行走距離}}{\text{紙帶每秒行走距離}}$ 求得，本試驗之 $t = 0.1 \text{ sec}$ ）。

ν = 儲氣箱之容積， 2.2 l 。

本試驗第一次噴氣處理點與第二次噴氣處理點，綜合土槽中所測得土壤反作用力，取其大者，可得表三之數據。

表三、不同作用半徑及土壤深度下，土壤反作用力 (F) 之分佈情形

Table 3. The force distribution in the soil bin at different effect radius and depth.

深度, cm (Depth) D	半 徑 (Radius) R, cm							
	10	20	30	40	50	60	70	80
10	8.78	8.78	9.52	5.11	4.05	2.63	2.19	1.38
20	24.77	10.95	5.84	5.00	3.74	1.75	1.35	0.92
30	18.36	11.25	6.19	4.83	2.88	1.66	1.44	0.87
40	18.36	9.03	5.36	4.59	1.63	1.48	0.43	0.41
50	12.24	4.74	2.16	1.49	1.44	0.77	0.15	0.15

探討土壤反作用力 (F) 與作用半徑 (R) 及土壤深度 (D) 之關係，若深度為定值時，可建立如下之迴歸關係式：

$$D=10 \text{ cm 時} \quad F1=10.9950-0.126R \quad (15)$$

$$r=0.9436, \quad r^2=0.8904$$

$$D=20 \text{ cm} \quad F2=30.2496-0.945R+0.007R^2 \quad (16)$$

$$r=0.9553, \quad r^2=0.9127$$

$$D=30 \text{ cm}, \quad F3=23.6200-0.686R+0.005R^2 \quad (17)$$

$$r=0.9880, \quad r^2=0.9762$$

$$D=40 \text{ cm}, \quad F4=22.9452-0.696R+0.005R^2 \quad (18)$$

$$r=0.9743, \quad r^2=0.9492$$

$$D=50 \text{ cm}, \quad F5=14.9720-0.499R+0.004R^2 \quad (19)$$

$$r=0.9423, \quad r^2=0.8880$$

(15)~(19)諸式表示如果在實行噴氣深耕時，在一已知土壤深度及作用半徑下，可求得土壤中此位置之反作用力。或已知一深度及反作用力，亦可求得在此位置之作用半徑。其關係可用線圖表示，如圖十三所示。

圖十三顯示土壤反作用力與作用半徑成反比。F、R、D三者之關係，亦可用一綜合之迴歸方程式以表示之：

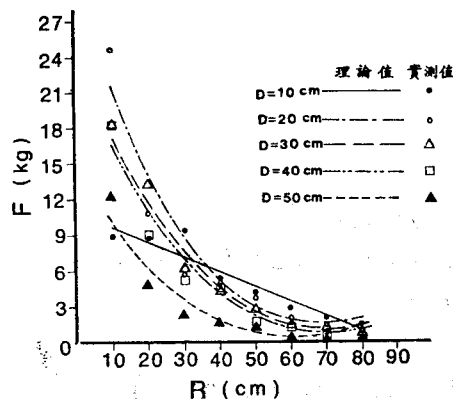
$$F=18.8014-0.590R+0.004R^2 \\ +0.247D-0.005D^2 \quad (20)$$

$$r=0.9146, \quad r^2=0.8364$$

上式顯示土壤反作用力與土壤深度成正比，但與作用半徑成反比。

(三)建立最佳噴氣作業條件之模式

首先決定在距植株若干距離處 (X_1) 根羣之分佈最密集，此處根能承受之抗剪力 (Y) 即可依(1)式求出。或根在若干直徑 (X_2) 下可被切斷而對作物不會有傷害，亦可依(3)式求得一Y值。或利用 X_1 與 X_2 亦可由(3)式求得一對應之Y值。此Y值代表在距植株 X_1 距離時能承受之最大抗剪力，此抗剪力必須大於土壤中之反作用力，即 $Y \geq F$ 。若根之分佈深度 (D) 已知，或實行噴氣深耕時希望能有效地改善土壤物理性之深度已知，則可將F及D值代入(15)~(19)式 (或 (20) 式) 中，即可求得一半徑 (R)。此半徑再加上根距植株之距離 X_1 ，就



圖十三、在五種固定深度 (D=10, 20, 30, 40, 50cm) 下，土壤反作用力與作用半徑之關係。

Fig 13. The relationship of force and effect radius in variable depth levels.

是實施噴氣深耕時噴氣點應距離植株之最佳位置，在此最佳位置，不但土壤物理性可有效地獲得改善，且不會傷害根羣，有助於根羣之發育。

茲以葡萄為例，說明如何尋求最佳噴氣作業條件。

葡萄之栽培方法一般分為籬笆式與棚架式兩種，籬笆式之葡萄根羣分佈大部份往籬笆之方向，但植株附近之鬚根很多；棚架式則其根羣分佈與地上枝幹之分佈成正比例關係。一般而言，根之直徑若在 8mm 以上者，稱為粗根，它有固定植株之最大功用，5mm 以下者稱為細根，細根如果被打斷的數量不太多，可以長出更多之鬚根，可增加根羣吸收養分水分之能力，以促進植株之生長。

本試驗採用之葡萄為籬笆式，經測定發現其根羣分佈最密處為距主幹 30cm 以內，在此範圍內之根羣不宜受到傷害，因此，取 $X_1=30\text{cm}$ (300mm) 代入(1)式，求得在此位置根之抗剪力為

$$Y = 3.7996 - 0.004(300) \\ = 2.6 \text{ kg}$$

根直徑可被打斷之上限為 5mm，在此取根直徑為 4mm，代入(2)式亦可求得在根徑為 4mm 時之抗剪力。

$$Y = -1.6366 + 1.093(4) \\ = 2.7 \text{ kg}$$

若綜合 $X_1=300\text{mm}$ ， $X_2=4\text{mm}$ ，代入(3)式亦可求得

$$Y = -4.9694 + 0.004(300) \\ + 1.872(4) - 0.001(300)(4) \\ = 2.5 \text{ kg}$$

為安全計，取葡萄根所承受之抗剪力為 2.5kg，在土壤中，此抗剪力必須大於或等於土壤在此位置之反作用力，因此， $F \leq 2.5\text{kg}$ 。而葡萄根之分佈以 20~40cm 深度為最多，故以 $D=20\text{cm}$ 及 $D=40\text{cm}$ 分別代入(6)及(8)式求得 $R=43\text{cm}$ ，及 $R=42\text{cm}$ ，故知根距噴氣點之距離（亦即作用半徑）應取 42cm。

最佳噴氣作業位置應為根距植株距離（ X_1 ）與根距噴氣點之距離（ R ）之和，即 $30\text{cm} + 42\text{cm} = 72\text{cm}$ 。故葡萄（砧木，三年生）實施噴氣深耕時，其最佳之噴氣位置應距離植株 72cm。

五、中耕作業成本分析

根據農林廳之調查報告⁽¹³⁾指出，1982 年本省

葡萄之生產費用中，以人工費用所占比例最高。其中巨峰葡萄人工費占 53.08%，金香葡萄人工費占 37.93%，可見在葡萄之生產過程中，機械化之程度尚且不高。噴氣式深耕機適合於深根性作物，尤其是果樹，因此，以巨峰葡萄為例，分析噴氣式深耕機與一般傳統機械中耕機與人工中耕等三種中耕方式所需之成本，俾作為機械化及經濟效益評估之依據。

(一)噴氣式深耕機中耕成本

バンダー深耕機目前配合野與 TS60CT6 馬力柴油引擎及復盛牌 TM-12 型空氣壓縮機使用，全套售價 57500 元。設每年最適宜工作面積為 10 公頃，機械有效使用年限為 10 年。

1. 固定成本

(1) 折舊：以直線法計算

$$\frac{57500 - 5750}{10} = 5175 \text{ 元/年}$$

(2) 利息：以年息 10% 計算

$$57500 \times 10\% = 5750 \text{ 元/年}$$

$$\text{小計 } 5175 + 5750 = 10925 \text{ 元/年}$$

$$\text{折合 } 10925/10 = 1092.5 \text{ 元/公頃}$$

2. 變動成本（操作成本）

巨峰葡萄之行株距為 4.5×4.5 公尺，每公頃約種 500 株，每兩株中間噴氣深耕處理之，則須處理 $2 \times 500 = 1000$ 次之深耕作業。作業時在每一個處理點上噴兩次高壓空氣，第一次距地表面 25cm 深，第二次 45cm 深。處理一個作業點所需之時間約為 30 秒，故每公頃所需噴氣處理之時間共為 $1000 \text{ 次/公頃} \times 0.5 \text{ 分/次} = 500 \text{ 分/公頃} = 8.3 \text{ 小時/公頃}$ 。

(1) 人工費：二人操作，

$$2 \times 8.3 \text{ 小時/公頃} \times 60 \text{ 元/小時} \\ = 996 \text{ 元/公頃}$$

(2) 燃料費：柴油引擎 TS60CT，6 馬力，其燃油消耗率為 210 克/馬力·小時，柴油比重為 0.85，故其耗油量為 $210 \text{ 公克/馬力} \cdot \text{小時} \times 6 \text{ 馬力} \times 1/0.85 \text{ 公升/公克} \times 1/1000 \text{ 公斤/公克} = 1.48 \text{ 公升/小時}$ 。

故其燃料費為

$$1.48 \text{ 公升/小時} \times 8.3 \text{ 小時/公頃} \\ \times 14 \text{ 元/公升} = 172 \text{ 元/公頃}$$

(3) 修理費：按售價之 2% 計算

$$57500 \times 2\% = 1150 \text{ 元/年折合 } 115 \text{ 元/公頃}$$

小計： $996+172+115=1283$ 元/公頃

合計 $1092.5+1283=2375.5$ 元/公頃

≈ 2376 元/公頃

(二)傳統機械式中耕機成本

最常用之型式為大順 TS651-D 型配合野興 TS60CT 柴油引擎使用，其售價為 59500 元，設使用年限為 10 年，每年最適宜工作面積為 10 公頃。

1. 固定成本：

(1)折舊： $\frac{59500-5950}{10}=5355$ 元/年。

(2)利息： $59500 \times 10\% = 5950$ 元/年

小計： $5355+5950=11305$ 元/年

折合： $11305/10=1130.5$ 元/公頃。

2. 變動成本：

本機械其工作能量為 0.15 公頃/小時=13.2

小時/公頃。

(1)人工費：二人操作

2×13.2 小時/公頃 $\times 60$ 元/小時

$=1584$ 元/公頃。

(2)燃料費： 14.8 公升/小時 $\times 13.2$ 小時/公頃

$\times 14$ 元/公升 $=273.5$ 元/公頃。

(3)修理費： $59500 \times 2\% = 1190$ 元/年

折合 119 元/公頃

小計： $1584+273.5+119=1976.5$ 元/公頃

合計： $1130.5+1976.5=3107$ 元/公頃。

(三)人工中耕成本

依據農林廳調查報告，民國 71 年巨峰葡萄生產成本中：

1. 中耕除草：工時為 153.5 小時/公頃

工資為 8124 元/公頃。

2. 翻土：工時為 80 小時/公頃

工資為 3077 元/公頃。

合計 所需工時為 233.5 小時/公頃

所需成本為 11201 元/公頃。

四、中耕成本比較

由以上之中耕成本計算，可得表四之資料。

表四，三種中耕方法之成本比較

Table 4. The costs of different cultivating methods

中耕方法 (Cultivating methods)	所需成本 (Costs) 元/公頃 (dollars/ha)	百分比(%) (Percent)
人力 (man power)	11,201	100
機械式中耕機 (mechanical-cultivator)	3,107	28
噴氣式中耕機 (pneumatic-cultivator)	2,376	21

由上表可知噴氣式深耕機之中耕成本比其他方式為低，只占人力作業之 21%，約為機械式之 76%。噴氣式深耕機經過本系之研究改良後，亦可兼作地下施肥及病蟲害防治之用途，不但可提高本機械之利用價值，且其作業成本應可更形減少。

六、結 論

(一)由葡萄根羣抗剪力之測定與土槽噴氣之試驗，可獲得下列結論：

1. 葡萄（砧木品種，三年生）根之抗剪力與根之直徑成正比，與根距植株之距離成反比。

2. 由土槽噴氣試驗得知，高壓空氣（10 kg/cm²）於土壤深度為 45cm 處瞬間噴出，其能有效改善土壤物理性之範圍為高壓空氣運動路徑所構成滑線之上端部份，其有效之半徑約為 70cm。

3. 深耕機於 45cm 深度噴氣作業時，其高壓空氣造成之土壤反作用力與土壤深度成正比，而與作用半徑成反比。

4. 根據葡萄根抗剪力及土槽噴氣試驗等資料，可求得葡萄之最佳噴氣深耕條件為距植株 72cm 處實施深耕。

(二)本研究之學術價值及經濟效益

1. 學術價值

建立深耕機噴氣作業之最佳模式。

先在土槽中實驗，建立深耕機噴氣後土壤中承受反作用力與土壤深度，作用半徑間之基本資料，並以葡萄為例，測其根之抗剪力，再依葡萄根羣分佈之特性配合土槽噴氣試驗之資料，尋求葡萄實施噴氣深耕時之最佳作業條件。

對於其他須深耕之作物，只需測定此作物根之抗剪力，亦可同理求得該作物實施噴氣深耕之最佳作業條件。

2. 經濟效益

(1)噴氣式深耕機實施噴氣深耕作業，對巨峰葡萄而言，其每年每公頃之成本為 2376 元，只占人工

(11201 元) 之 21%，占機械式中耕機 (3107 元) 之 76%，它是三種中耕方式中最節省成本的方式。

(2) 依據葡萄最佳噴氣作業模式之建立，可使噴氣式深耕機在最佳之條件下使用，避免根羣被切斷，有助於土壤物理性之改善及作物之發育，產量之提高。

(3) 深耕機本體經過機械之改良，加裝液體輸入裝置與液體貯存裝置後，亦可作為土壤中液態肥料或藥液噴注之用，使本機械除了兼具深耕、促進排水之目的外，尚兼具地下施肥與病蟲害防治等多用途，達到農業機械多角化利用之目標。

謝 誌

本研究承本系樂家敏老師之熱心協助，系主任黃陽仁教授之提供寶貴意見，郭來標、翁郁凱同學等多人之協助試驗及資料分析，農試所園藝系王為一先生慨允借用葡萄試驗場地，本校園藝系范念慈、楊耀群教授，土壤系楊策羣、王明果教授等提供珍貴之資料，始克順利完成。同時又承經濟部農業機械化基金保管運用委員會之經費補助及農發會農機小組諸位先生之指導，謹於此致最高之謝忱。

參 考 文 獻

1. 陳振鐸，1971，土壤物理學，正中書局。
2. 陳振鐸，1982，基本土壤學，徐氏基金會。
3. 郭魁士，1983，土壤學，中國書局。
4. 彭錦樵，黃陽仁，1982，噴氣式管理機械之田間試驗研究，中國農業工程學報，第 28 卷第 4 期。
5. 彭錦樵，1983，噴氣式深耕機對土壤物理性及其空氣動力學特性之影響，科學發展月刊，第 11 卷第 1 期。
6. 彭錦樵，樂家敏，1983，噴氣式深耕機對葡萄生長特性之試驗，中國農業工程學報，第 29 卷第 2 期。
7. 彭錦樵，樂家敏，吳良坤，1983，噴氣式深耕機地下施肥及病蟲害防治裝置，(72) 臺專機五字第 111398 號。
8. 楊尙仁，1976，機械採收對土壤密實度及宿根甘蔗產量之影響，臺灣糖業研究所彙報 72 號。
9. 楊策羣，林正鏘，1975，臺中砂頁岩沖積土中氧的季節性變化及其對旱作的可能影響，國科會研究彙報。
10. 楊策羣，許義祥，楊尙仁，1978，土壤氧氣濃度對新植甘蔗生育影響之初步研究，臺灣糖業研究所彙報第 80 號。
11. 薛鎮江，1967，蔗田土壤密度對甘蔗生長之影響，臺灣糖業研究所研究彙報。
12. 譚克終，1978，果樹園藝大要汎論，徐氏基金會。
13. 臺灣省政府農林廳，1983，臺灣農產品生產成本調查報告。
14. 岩崎一男，1981，作物栽培と土壤空氣，岩谷產業株式會社。
15. 島根縣農業試驗場，1978，農業試驗場研究成果發表會，發表要旨集。
16. 農業生產工學研究會，1981，壓縮空氣の注入による土層改良および作物の生育效果に關する試驗成績概要——1. 果樹園に對する效果；2. 野菜園に對する效果。
17. Ogata, Katsuhiko 1978. System Dynamics, 淡江書局。
18. Zucker, Robert D. 1978, Fundamentals of Gas Dynamics. 美亞書版股份有限公司。
19. Smerdon, E.T., and C.M. Hohn: "Relationships between the Rate of Advance and Intake Rate in Furrow Irrigation" Texas Agricultural Experiment Station, MP-509, Texas A and M, pp 32-35. April 1961, U.S.A.
20. Su, H.H.. "Hydraulics of Unsteady Open Channel Flow Over a Porous Bed" unpublished, M.S. Thesis, Utah State University, Logan, Utah, pp 31-37, U.S.A., 1961
21. Taiwan Provincial Water Conservancy Bureau: "Summary on Irrigation of Sandy Dome in Chi-tin, Miao-li County", pp 2-8, 1978.
22. Taiwan Provincial Water Conservancy Bureau: "Report on Planning of Upland Crop Irrigation in Shui-sui, Hua-lien County", pp 8-11, 1977.
23. Taiwan Sugar Research Institute: "Hand Book of Agronomy of Taiwan Sugar Cooperated Company", Chapter 1-3, 1981.
24. Tinney, E.R. and D.L. Bassett: "Terminal Shape of a Shallow Liquid Front", Journal of Hydraulics Division, Proceedings, ASCE, Vol. 87, HY5, pp 117-133, September 1961.

(上接第 46 頁)