

健康清潔植物培育研習會

中華民國植物病理學會 編

中華民國植物病理學會 主辦
臺灣省農業試驗所嘉義試驗分所 協辦
臺灣省農林廳植物保護科 支助

應用蒸汽消毒法防治土傳性真菌病害之研究

李敏郎

臺灣省農業藥物毒物試驗所農藥應用系

摘要

蒸汽消毒乃利用高溫使生物細胞內的蛋白質凝固及酵素不活化，達到殺死生物之目的，可同時控制病害、地下害蟲、雜草問題，使作物充分利用土壤養分、水分及陽光，促進生育，進而減少化學藥劑施用。蒸汽消毒應用時，必須考慮蒸汽溫度、處理時間、土壤水份含量、通氣性和其對土壤微生物相及土壤化學成份變化情形等因素。蒸汽處理溫度過高，容易引起土壤生物相真空，若有病原污染或種苗帶菌，可能引起更嚴重的病害。土壤化學成份由於高溫關係，引起交換性錳元素增加，硝酸態氮含量減少，氨及亞硝酸態氮增加，可能影響作物生育。在荷蘭最常使用覆蓋蒸汽消毒法(sheet steaming)處理土壤，而本省土壤蒸氣消毒可分成固定式及移動式兩種。國外蒸汽消毒處理已成功地應用在養菇業與防治柑橘及桃根朽病(*Armillaria mellea*)、番茄萎凋病(*Fusarium oxysporum*)等方面。土壤蒸汽消毒的最佳條件為60-80C處理30分鐘，以葵百合黃化病為例，主要由*Fusarium oxysporum* f. sp. *lilii*、*F. solani*、*Rhizoctonia solani*及*Pythium* spp.單獨或複合感染引起，連作田的葵百合發病率高達65.2%，在同一塊田分成土壤蒸氣處理(80C、20分鐘及60C、30分鐘)和對照組，結果蒸氣消毒處理均有利葵百合生育及病害防治，並提高切花品質及產量。採收切花時，80C處理者黃化情形最少，只有2.5%，60C處理者次之，為20.7%，對照組則高達53.7%；以產量而言，80C、60C處理者及對照組分別生產24.8、

23.1及14.8 cut flower/m²；此外，經土壤蒸汽消毒處理後，亦可達到防除雜草之目的。土壤蒸氣消毒如何克服使用技術及成本，而能適時適地地應用於栽培管理及病害防治工作，值得更多的研究及應用。

前言

土壤傳播性病蟲害之防治方式有淹水(1,16,20,24,28,34,35)、輪作(1,12)、土壤燻蒸(1-3,5,7,14,25,28)、蒸汽消毒(1,2,4-7,8,18,19,26-32,36)、藥劑防治(1,3,13,31)、抗病育種(1)及綜合防治(1)等等。由於環境保護日趨重要，為避免農藥對環境的污染，在這些防治手段中以淹水、土壤蒸汽消毒、輪作、抗病育種或綜合防治是未來應用重點，因此土壤燻蒸法(常用溴化甲烷)效果雖好，但所使用的化學物質會使土壤中有益及有害微生物同時消滅殆盡(1,3-5,13,14)，並破壞土壤物理及化學結構，且有破壞臭氧層的疑慮及對人體產生毒害的影響。與水稻田輪作或逕行淹水處理雖頗理想，但並非適合每位栽培者，而綜合防治必須了解病害發生的環境條件及田間管理方式進行，不一定適合每個地方(1,4,6-8,11,25,31)。設施栽培之土壤傳播性病蟲害防治，可採用休耕、輪作及土壤蒸汽消毒等方式(19)，其中土壤蒸汽消毒優點在於不會有農藥殘留及環境污染的問題，待土壤溫度降低後就可以進行種植，可爭取時效。土壤經60-80C蒸汽消毒後，不會造成生物相真空，將有害的植物病原族群降到最低，留下耐熱性的微生物，這些耐熱性微生物大都具有拮抗病原菌的作用(1,6,8,11,19,28-30)，有益於土傳性病害之防治，同時土壤蒸汽消毒可殺死地下害蟲、小動物及雜草種子(6)，因而減少或甚至不用殺蟲劑及殺草劑，降低農藥對環境生態的影響。

響。將土壤蒸汽消毒應用到田間、設施栽培及介質回收利用等方面，是一個頗具潛力的防治方式。

一、土壤蒸氣消毒原理

土壤蒸汽消毒處理時，在蒸汽釋出20分鐘後，可水平及垂直地滲透到20.3cm處(6)，溫度在土壤中的分布非常均勻，不像土壤燻蒸劑，隨著釋放的距離而逐漸稀釋，且有藥效不足情形(13,15)。蒸氣高溫可使生物的蛋白質凝固及酵素不活化(2)，溫度條件為60-80C，30分鐘可殺死大部分的植物病原(表一)。

蒸汽消毒對土壤微生物的影響如下：

- 1.植物病原真菌、細菌及線蟲均被消滅，絕大部份的病毒不活化。
- 2.真菌數量與種類受影響最大，殘存的微生物多為具有產生抗生素潛力的種類，細菌及放線菌相比真菌相更能忍受熱處理(29)。
- 3.受熱處理而打破休眠的子囊菌與細菌種類族群比例增加。
- 4.靜菌作用打破後，需三天來恢復靜菌作用，若要恢復到先前未處理的狀況，約需八天(10)。
- 5.若以100C處理30分鐘土壤，會產生對植物有毒害的物質，例如錳過多，對萵苣(23,33)、玫瑰(33)、康乃馨(17,34)等作物造成毒害，另一方面導致土壤大量地產生 weed molds，如 *Peziza ostrachoderma*, *Trichoderma viride*, *Pyronema confluens*等。但60C處理30分鐘者，則發生的情形少(6)。
- 6.進行蒸汽處理前三天若能保持土壤溼度，則大部分雜草會被殺死(6)。

表一、蒸汽溫度對土壤生物相及雜草之影響

Table 1. Effect of temperature of steam on the soil

organisms and weeds

| 溫度(C) | 致死之土壤生物相 |
|-------|-------------------|
| 100 | 所有病原微生物、雜草 |
| 93 | 耐熱性的病毒、雜草 |
| 82 | 大多數雜草及病毒；所有植物病原細菌 |
| 60-71 | 大多數植物病原真菌及細菌 |
| 49-60 | 立枯絲核菌 |
| 49 | 線蟲 |
| 38-49 | 水生藻類 |

影響蒸汽消毒效果之土壤條件：

- 1.處理面積與蒸汽壓力：處理的面積越大，所需要之蒸汽壓力就越大。
- 2.蒸汽口之間的距離及埋設的深度：蒸汽出口的有效溫度半徑為20.3公分，深度為作物根系生育範圍，約20-30公分深(6)。
- 3.處理時間：土壤溫度越低，所需處理的時間越長(27)。
- 4.土壤狀態：土壤溼度與土壤顆粒間間隙有密切關係，溼度越大，所需消毒的時間越久，效果越差(27)。

二、蒸汽消毒對土壤化學成份的影響

蒸汽高溫(100C)造成土壤產生化學反應，導致土壤養分移動及有機質分解(21,33)，尤其是錳及氮所受的影響最大(1,8,9,17,18,21-23,30,32,33,36)。交換性

錳 (exchangeable manganese) 含量會因高溫而大量增加(1,6,8,9,17,18,22,23,32,33)，容易造成萵苣(23,33)、玫瑰(33)、康乃馨(17,34)、胡瓜(23)、香瓜(22)及番茄(9)等之毒害作用。錳元素在土壤蒸汽消毒後，維持高含量狀態的時間非常久，此因錳的氧化細菌被高溫殺死，無法在短期內使錳被分解而下降到原先的含量(30,33)。土壤中的硝酸態氮及氨態氮可被植物吸收利用，但100C高溫下，會殺死硝化作用細菌，造成土壤硝酸態氮(nitrate)含量降低，亞硝酸態氮(nitrite)及氨(ammonium)的含量增加(30,33)，使作物無法獲得足夠的氮素源，由於土壤中氨的累積，使番茄、芹菜及萬壽菊等敏感作物(1,36)受害。為避免這類問題的發生，蒸汽消毒的溫度最好維持在60-80度之間(1,2,6,8,19,21,28,30,32,33,36)。

三、土壤蒸汽消毒的適用對象

以經濟價值高的花卉及無農藥污染之蔬菜生產，栽培介質之回收處理以達資源回收及降低成本為適用對象。高經濟價值的花卉大都採用簡易溫室方式栽培，在固定設施下，一般採用淹水及燻蒸處理，前者必須配合夏天較高的氣溫，且處理45天以上才有良好的防病效果(1,20,24,28,34,35)；後者由於毒性的問題(1,2,3,14)，必須小心使用，不若蒸汽消毒處理時間短，無任何農藥毒性問題。園藝介質的回收利用亦可採用蒸汽消毒方式，在短時間內可以完成消毒，溫度下降後，就可以直接再利用。蒸汽消毒在處理時間上非常短，60-80C溫度處理對生態環境的衝擊也最小(6,27,30,32,33)。

四、土壤蒸汽消毒方式

(一)荷蘭溫室之土壤蒸汽消毒方式

荷蘭溫室設施栽培的歷史非常久，對土壤病害方面的防治大都採用休耕、輪作及土壤消毒的方式進行(27)。荷蘭於1990年1月1日起全面禁止使用溴化甲烷，大部分的栽培者改採蒸汽消毒防治土傳性病害(30)，土壤蒸汽處理的發展過程中，不斷地改良蒸汽消毒之效率與方法，茲就荷蘭之蒸汽消毒發展過程介紹如下(27)：

1.Hoddesdon管路系統(Hoddesdon pipe system)

蒸汽管上打孔供蒸汽釋出，埋設在土深25cm處，蒸汽消毒處理後，必須拔出埋設的蒸汽管，重新埋設在未消毒區，此法非常耗費人工。

2.長釘格系統(Spiked grids system)

由直徑3.6公分，長4.35公尺鋼管所組成的格狀蒸汽管結構，蒸汽管之間相距35公分，鋼管上每30公分突出一根長32公分的中空長釘，將此一長釘格狀結構插入土壤中，形成一個立體的蒸汽消毒系統。缺點為溫度分布不均勻及需要大量勞工。

3.蒸汽耕耘法(Steaming plough)

採用寬3m，能夠深入土層40公分的犁頭及絞盤，一邊耕耘，一邊釋出蒸汽，雖然較節省人工，但若耕耘的速度不一，易造成溫度分布不均勻。

4.覆蓋式蒸汽消毒法(Sheet steaming)

此為荷蘭目前使用最多的蒸汽消毒方式。將厚度0.25mm、寬3.6m的PVC塑膠布平鋪在土表，塑膠布邊緣以重物固定，然後送入蒸汽，使蒸汽直接滲透到土層中。這種做法必須考慮到下列條件：

- (1)土壤溼度：蒸汽消毒過程中，蒸汽會凝結成水，通常會增加5-6%土壤含水量，土深10cm深的土壤水分會增加10-11%，土壤越乾燥，越能吸附凝結水，消毒的效果越好(27)。
- (2)土壤種類及耕耘方式：通風良好的黏土(well-aerated clay soils)通常不用耕耘，蒸汽可以直接滲透到較深的土層中。砂土或壤土(sand or loam soils)在蒸汽消毒前，必須先耕耘一次。泥炭土(Peat soils)由於保水力強，很難進行蒸汽處理。
- (3)塑膠布下的蒸汽壓力：必須利用寬3.6m，孔目大小為10cm的尼龍網覆蓋在塑膠布上，增加一些壓力，使深層的土壤能夠維持70C一小時。
- (4)塑膠布的固定：可用沙袋、船錨鍊條或土壤固定塑膠布，一般建議使用前兩者方式，若是採用土壤固定，由於固定用的土壤未消毒，有污染消毒過土壤的可能性。

目前改良成在土深0.55-0.6m處埋設打孔的管路，管路之間相距1.6-3.2公尺，當蒸汽吹入已覆蓋帆布的土表時，藉由埋設好的管路將蒸汽吸入，可在較短的時間內使土壤溫度均勻分布(30)。

5.排水管蒸汽法(Steaming via drain pipes)

進行排水管理設時，也將蒸汽管一併埋入，埋設的深度為50-55cm，排水管之間的距離為80cm，一個栽培床需要4條，排水管的長度一次不可超過20m，若是超過20m，則蒸汽進入蒸汽管的位置必須另外設計。土表最好覆蓋一層塑

膠布，比較容易達到所要的溫度，當土表溫度達到所要的溫度時，就可以視為已完成蒸汽消毒。此種方式和塑膠布覆蓋蒸汽消毒的方式相比，可以消毒較深的土層，土壤溫度分布較均勻，處理的時間也比較短，燃料也較節省。

6. 蒸汽—空氣混合之巴斯德消毒法(Pasteurization with a steam-air mixture)

於蒸汽管系統中，送入一定量的空氣，將空氣與蒸汽混合後送入土壤中，以72C熱空氣送入土壤中後，在土表10, 25及45cm深的土溫分別為68, 71及65C，目前已使用在萵苣栽培方面(27,32)，但是相對地必須消耗更多的電量、燃料及人工成本，比較不實用(27,30)。

(二) 本省簡易網室之土壤蒸汽消毒方式

本省在栽培業者的努力下，土壤蒸汽消毒法已經在田間使用多年：

1. 移動式蒸汽消毒法

以本省嘉義縣王姓農友之花卉農場為例，農場面積達一甲地，利用小貨車架設水桶、油桶、發電機及蒸汽機，可在山坡地自由移動，只需一人操作，每兩個月處理一次。操做方式是將畦做好後，將蒸汽管放在畦面上，覆蓋耐熱帆布，消毒十分鐘後，在耐熱帆布覆蓋下移動蒸汽管到相鄰而未消毒區域，持續地將土壤消毒完畢。三年來，花卉白絹病之發病率年年下降，成效良好。

2. 耕耘式蒸汽消毒法

以台北縣尤姓農友之網室蔬菜栽培為例，在簡易網室(6x30m²)內栽培蔬菜，只利用一台100公升水量的蒸汽機，配合自行研發的拖拉式蒸汽管(有15公分中空鋼管，可插入土中)及可調整速度之自動捲線器，將蒸汽機啓動後，設定好蒸汽管移動速率(10公分/分鐘)，蒸汽管一邊向前移動，一邊釋出蒸汽消毒，土表不用任何覆蓋物，不需額外的人力，只要一個人操作即可，每三個月處理一次，五年來有效地控制蔬菜的土傳性病蟲害，不用任何土壤病原菌及害蟲之殺菌劑、殺蟲劑或殺草劑等農藥。生產的蔬菜品質非常好，且土壤中無農藥殘留的問題。

五、蒸汽消毒防治土傳性病害之應用實例

(一)國外蒸汽消毒應用之實例

最成功的例子為養菇業應用發酵及巴斯德式蒸汽消毒，成功地控制為害菇類的真菌、細菌及線蟲(19)；柑橘及桃樹根部利用CS₂處理26天或應用空氣和蒸汽(aerated steam)混合成33C的熱空氣處理7天後，可降低根部內*Armillaria mellea*活性，進而被*Trichoderma viride*摧毀，達到防治方式(6,7,25)；溫室土壤利用80-85C蒸汽處理4-6小時後，在去除覆蓋物後，立刻以四氫丹(Captafol，國內現已禁用)噴灌蒸汽處理過之土表，結果番茄萎凋病(*Fusarium oxysporum*)發病率僅有5%，而之前發病率達85-90%(31)；70C、30分鐘蒸汽處理及121C、3小時的高壓滅菌方式，可以防治芹菜黃葉病(*Fusarium oxysporum* f. sp. *apii*)，且有促進芹菜苗生長作用(5)。蘋果重植問題也因蒸汽消毒獲得解決(26)。

(二)本省蒸汽消毒應用實例

除上述之嘉義及台北縣蒸汽消毒防治土傳性病蟲害外，以葵百合(*Lilium oriental hybrid cv. "Star Gazer"*)爲例，在台中縣一塊已連作五年之田地進行蒸汽消毒試驗，往常每年九月底種植前，先經淹水一個月以上，然後進行排水、曝曬、鬆土及利用溴化甲烷($28.3\text{g}/\text{cm}^2$)處理，才種植葵百合，切花時的植株黃化病發病率高達65.2%，大都由*Fusarium spp.*、*Pythium spp.*及*Rhizoctonia solani*引起。而同一塊田直接耕耘鬆土後，進行蒸汽消毒處理，利用1m長鋼管連結成10m長的蒸汽管路，每畦(畦寬0.75m)放置兩根各10m長蒸汽管，將蒸汽管上20公分長銅管插入土壤中，銅管末端封閉，蒸汽出口在15公分處，溫度感應器插在蒸汽管路末端附近的土壤，將溫度感應器、蒸汽管及所要處理的土壤以耐熱橡皮布覆蓋，利用重物固定，當溫度達80C或60C時，分別保持20分鐘或30分鐘。然後掀開橡皮布，將蒸汽管路及溫度感應器移到另外一區，繼續土壤蒸汽處理，待土壤溫度恢復常溫後，種植葵百合，地上部用藥劑保護外，所有防治土壤病蟲害及雜草的藥劑均不再使用。

三個月後，葵百合採收切花時，80C、60C處理者及對照組之百合切花產量分別生產24.8、23.1及14.8 cut flower/m²。在病害防治方面，以80C處理者百合黃化病最少，平均只有4.6%，60C處理者次之，爲14.6%，對照組爲45.3%。

蒸汽消毒之前途與未來展望

利用蒸汽消毒土壤的方式，的確可以有效地降低因連作關係所導致的土傳性病蟲害問題，但是土壤蒸汽消毒也有它的缺點，茲將土壤蒸汽消毒的優缺點列舉如下：

一、土壤蒸汽消毒優點：

- 1.符合環保條件及降低生產成本：可減少施用殺菌劑、殺蟲劑及殺草劑，降低農藥對環境的污染，土壤無農藥殘留問題，大氣中無有礙環境或生物的揮發性化學物質。
- 2.選擇性殺菌作用：土壤不會造成生物真空狀態，僅去除大部分有害的土壤微生物、害蟲及雜草，留下耐熱性的有益微生物，包括真菌、細菌及放線菌，尤以後兩者居多(6,30)。
- 3.土壤經蒸汽消毒處理後，土壤溫度很快恢復到正常溫度，即可種植。
- 4.蒸汽消毒對土壤的物理及化學結構的變化影響最低(6,30,33)。
- 5.一般而言，只需土溫維持60C~80C之間約20~30分鐘，就可得到最大的病害防治效果，可解決連作田所帶來的病蟲害問題。
- 6.土壤蒸汽處理妥當時，可促進作物生產，提高品質。

二、土壤蒸汽消毒缺點：

- 1.消毒面積問題：一棟面積約6X40公尺的簡易網室，其土壤蒸汽消毒處理所需蒸汽量非常大，相對地蒸汽機成本非常高。
- 2.移動性問題：田間簡易設施並非集中一處，消毒一處後，如何移動到另一個設施內，伴隨而來的是水、電及油的供應問題。
- 3.成本問題：與藥劑或土壤燻蒸劑成本比較，蒸汽消毒所耗的成本稍高，但是考量到使用殺菌劑、殺草劑、殺蟲劑等農藥所造成的農藥殘留、病原菌產生抗藥性，進而導致用藥成本不斷地支出，蒸汽消毒反而有更大的效益。

4.維修問題：由於農業機械講究田間實際應用，因此蒸汽機的設計必須在操作簡單、材料取得及維修容易的原則下，發展更符合田間需求的機型。

對於蒸汽處理的前途與未來展望提出個人淺見如下：

- 1.成本考量：有效溫度與處理時間牽涉到水、電、油等成本的支出，但是從長期的管理成本而言，蒸汽消毒的費用不會高於化學防治方式，且無殘留或農藥污染的問題。
- 2.應用時機之選擇：在大面積栽培時，則儘量採用與水稻輪作或淹水法，若設施栽培需在短期內連作或介質回收時，才利用蒸氣消毒處理。
- 3.蒸汽機之研發與改良：有必要配合農機、植病、土壤與園藝方面人才共同參與，研發與改良出適合本省農業栽培環境之蒸汽機與蒸汽處理系統，使本土農業生產上更有保障。
- 4.蒸汽處理在本省的前途：蒸汽消毒處理可適時適地應用於設施栽培、連作障礙之克服與介質回收利用等方面，達到良好的生產管理與環保作用。

參考文獻

1. 吳文希．1991．植物病害防治學。367-380p。
2. 李 晔．1989．土壤管理．p. 80-96．設施園藝技術．豐年社．376 pp。
3. 黃振文．1985．作物土壤傳播性病害的化學防治．p. 205-218．農藥毒性研討會論文專集．中央研究院動物研究所專刊。

4. Arora, D. K., Pandey, A. K., and Srivastva, A. K. 1996. Effects of heat stress on loss of C, germination and pathogenicity from chlamydospores of *Fusarium oxysporum* f. sp. *ciceri*. Soil Biol. Biochem. 28:399-407.
5. Awuah, R. T., and Lorbeer, J. W. 1991. Methyl bromide and steam treatment of an organic soil for control of Fusarium yellows of celery. Plant Dis. 75:123-125.
6. Baker, K. F. 1970. Selective killing of soil microorganisms by aerated steam. Pages 234-239 in: Root diseases and soil-borne pathogens. Toussoun, T. A., Bega, R. V., and Nelson, P. E. ed. Univ. of Calif. Press. Berkeley.
7. Darley, E. F., and Wilbur, W. D. 1954. Some relationships of carbon disulfide and *Trichoderma viride* in the control of *Armillaria mellea*. Phytopathology 44: 485.
8. Dawson, J. R., Johnson, R. A. H., Adams, P., and Last, F. T. 1965. Influence of steam/air mixtures, when used for heating soil, on biological and chemical properties that affect seedling growth. Ann. Applied Biol. 56: 243-251.
9. Dennis, D.J. 1968. Manganese toxicity in tomato seedlings. N. Z. J. Agric. 117: 118-119.
10. Dobbs, C. G., and Hinson, W. H. 1953. A widespread fungistasis in soils. Nature 172:197-199.
11. Freeman, S., and Katan, J. 1988. Weakening effect on propagules of *Fusarium* by sublethal heating. Phytopathology 78:1656-1661.
12. Glynne, M. D. 1965. Crop sequence in relation to soil-borne pathogens. Page 423-435 in: Ecology of soil-borne plant pathogens. Baker, K. F., and Snyder, W. C. ed. Univ. of Calif. Press, Berkeley and Los Angeles.

13. Goring, C. A. I. 1967. Physical aspects of soil in relation to the action of soil fungicides. *Ann. Rev. Phytopathol.* 5: 285-318.
14. Hartz, T. K., Carter, W. W., and Bruton, B. D. 1987. Failure of fumigation and solarization to control *Macrophomina phaseolina* and subsequent muskmelon vine decline. *Crop Prot.* 6:261-264.
15. Hemwall, J. B. 1959. A mathematical theory of soil fumigation. *Soil Sci.* 88: 184-190.
16. Hollis, J. P., and Rodriguez-Kabana, R. 1966. Rapid kill of nematodes in flooded soil. *Phytopathology* 56: 1015-1019.
17. Ishida, A., and Masui, M. 1973. Studies of the manganese excess of carnation. I. The steam sterilization and pH levels of soil. *J. Jpn. Soc. Hortic. Sci.* 42: 40-48.
18. Jager, G., Van der Boon, J., and Rauw, G. J. G. 1970. The influence of soil steaming on some properties of the soil and on the growth and heading of winter glasshouse lettuce. III. The influence of nitrogen form, manganese level and shading studied in sand culture experiments with trickle irrigation. *Neth. J. Agric. Sci.* 18: 158-167.
19. Lambert, E. B., and Ayers, T. T. 1952. An improved system of mushroom culture for better control of diseases. *Plant Dis. Repr.* 36:261-268.
20. Lodha, S. 1995. Soil solarization, summer irrigation and amendments for the control of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cumini* and *Macrophomina phaseolina* in arid soils. *Crop Prot.* 14:215-219.
21. Lyon, T. L., and Bizzel, J. A. 1910. Effect of steam sterilization on the water-soluble matter in soils. *Cornell Univ., Agric. Exp. Stn. Bull.* 275: 129-156.

22. Masui, M., and Suzuki, E. 1971. Studies on the manganese excess of muskmelon. I. On the survey of plant tissues and soil. J. Jpn. Soc. Hortic. Sci. 40: 367-374.
23. Messing, J. H. L. 1965. The effects of lime and superphosphate on manganese toxicity in steam-sterilized soil. Plant Soil 23: 1-16.
24. Moore, W. D. 1949. Flooding as a means of destroying the sclerotia of *Sclerotinia sclerotiorum*. Phytopathology 39: 920-927.
25. Moubasher, A. H. 1963. Selective effects of fumigation with carbon disulphide on the soil fungus flora. Trans. Brit. Mycol. Soc. 46:338-344.
26. Moyls, A. L., Hocking, R. P., Neilsen, G. H., and Hogue, E. J. 1994. Apple tree growth response in greenhouse pot tests using heat-treated replant soil versus orchard replanted trees with in situ heated soil. Acta Hort. 363:57-64.
27. Nederpel, L. 1979. Soil sterilization and pasteurization. Pages 29-38 in: Soil disinfection. Mulder, D. ed. Elsevier Scientific Publ. Co., 368pp.
28. Newhall, A.G. 1955. Disinfection of soil by heat, flooding, and fumigation. Bot. Rev. 21: 189-250.
29. Olsen, C. M., and Baker, K. F. 1968. Selective heat treatment of soil, and its effect on the inhibition of *Rhizoctonia solani* by *Bacillus subtilis*. Phytopathology 58: 79-87.
30. Raats, P. A. C. 1988. Disinfection of soils with steam. Acta Hort. 222:117-119.
31. Rowe, R. C., and Farley, J. D. 1978. Control of Fusarium crown and root rot of greenhouse tomatoes by inhibiting recolonization of steam-disinfested soil with a captafol drench. Phytopathology 68:1221-1224.

32. Sonneveld, C., and Voogt, S. 1973. The effects of soil sterilization with steam-air mixtures on the development of some glasshouse crops. *Plant Soil* 38: 415-423.
33. Sonneveld, C. 1979. Changes in chemical properties of soil caused by steam sterilization. Pages 39-50 in: *Soil disinfestation*. Mulder, D. ed. Elsevier Scientific Publ. Co., 368pp.
34. Stover, R. H. 1962. Fusarial wilt (Panama disease) of bananas and other *Musa* species. *Phytopathology Paper No. 4*, Commonwealth Mycological Institute, Kew, 117 pp.
35. Stover, R. H. 1979. Flooding of soil for disease control. Pages 19-28 in: *Soil disinfestation*. Mulder, D. ed. Elsevier Scientific Publ. Co., 368pp.
36. White, J. W. 1971. Interaction of nitrogenous fertilizers and steam on soil chemicals and carnation growth. *J. Am. Soc. Sci.* 96: 134-137.