

植物病害的非農藥防治品 - 亞磷酸

安寶貞

台中縣 行政院農業委員會農業試驗所 植物病理系

電子郵件: pjann@wufeng.tari.gov.tw; 傳真: 04-3338162

接受日期: 民國 90 年 11 月 9 日

摘要

安寶貞. 2001. 亞磷酸與植物病害的防治. 植病會刊 10:147-154.

亞磷酸原為緩效性磷肥的一種，1980年代被發現可以防治卵菌綱引起的植物病害。爾後，有關亞磷酸防治病害的作用與防病機制一直引起學者的興趣，至今仍在探討中。一般認為亞磷酸在高濃度下(1000 ppm 以上)對病菌的菌絲生長與產孢有干擾與抑制作用，有直接保護(direct protection)寄主的功效，但防病功效並不完全。近年來，許多報告均指出亞磷酸有誘導植物增強抗病性的間接防病(Indirect defense)的功效，它會加速植物抗禦素、酚化合物、或其他抗病物質的產生與量的累積。至於有關亞磷酸誘導寄主產生抗病反應的全程機制尚未完全了解，其正確切入抗病反應路徑的位置亦待求證。由於亞磷酸是強酸，水溶液的酸鹼值約為 pH 2-3，必須以鹼性物質中和至 pH 5.5-6.5 後，才能施用於植物體。目前在國外，亞磷酸已被開發與商品化，如 Foli-R-Fos 400 (20% H₃PO₃)，Nutri-Phite P Foliar (4% N-30% P₂O₅-8% K₂O)，及 Guard PK (7% N-21% P₂O₅-21% K₂O)。田間試驗顯示，亞磷酸對疫病菌、露菌病有良好的防治效果，經常用於酪梨根腐病、柑橘疫病、葡萄露菌病、萵苣與十字花科露菌病的防治。在台灣，一種簡單配製亞磷酸的方法已被研發出來，使用者與農民可以自行配製。其方法是將工業級的亞磷酸(95-99%)與氫氧化鉀(95%)以一比一等重使用，先將需用量的亞磷酸溶於水中，再溶解氫氧化鉀，調配好的亞磷酸的酸鹼值約 pH 6.0-6.2，可直接使用，可以減少調配亞磷酸酸鹼值時的費時與費工，並避免溶液於保存時，因氧化作用而導致藥效降低的情形。目前依照上述方法，亞磷酸普遍被農民用於蘭花疫病、番椒疫病、多種作物疫病與露菌病的田間防治。

關鍵詞：亞磷酸、亞磷酸鹽、誘導抗病、植物抗禦素、病害防治、疫病、露菌病

緒言

植物沒有『白血球』等免疫系統，不能像人類或其他動物一樣產生『抗體』，來與入侵的病原菌作戰，但植物也有特殊的構造與生化防禦系統來對抗入侵的病原菌。當有異物入侵時(包括機械傷害、蟲咬傷、病菌侵入時)，植物大都會啟動生化防禦系統(biochemical defense system)，合成抗菌物質(anti-pathogen substances)，來圍堵消滅病菌^(16,20)。這些抗菌物質包括酵素、蛋白質、基質(substrates)、解毒物質(detoxification substances)、酚化合物(phenolic compounds)等，其中又以『植物抗禦素(phytoalexin)』最受矚目，被認為與植物的抗病性有密切關係^(19,42,46)，在某些植物上被認為是抗病的核心⁽⁵⁵⁾。當病原入侵時，經過植物與病原菌兩者的交互作用(host-pathogen interaction)後會引發一連串的生化反應，誘導植物產生多種抗生物質。植物抗生物質形成速率(speed)的快慢與累積量(magnitude)的多寡受寄主-病原菌親和性(compatibility)程度的調控

(regulation)，將會決定寄主植物的抗感病性^(16,20)，而這一切生化防禦反應均受寄主-病原菌兩者的基因型控制⁽¹⁶⁾。

近年來發現，有些特殊的化學物質或微生物的分泌物被植物體吸收後，也能藉由改變(降低)寄主與病原菌的親和性關係^(35,39)，來增強寄主植物的抗病性，降低病害的發生，這種現象被稱為「誘導系統性抗病(induce systemic resistance (ISR))」⁽⁷⁾。它的機制就如同人類施打預防針一般，當病原菌入侵時，植物可以辨識，立即啟動防禦體系，與病原菌打仗。一些促進植物生長的根圈細菌(plant growth-promoting rhizobacteria, PGPR)⁽³⁶⁾(如 *Pseudomonas* spp.)與拮抗真菌(如木黴菌(*Trichoderma*)⁽⁶⁰⁾等)就有此種功能，它們除了直接對抗病原菌外，亦有增強植物抗性的雙重效果。在化學物質方面^(4,7)，如水楊酸(Salicylic acid)，撲殺熱(probenazole)等均能降低某些病原菌的危害。

1980年代一種防治卵菌類病害(Oomycetes diseases)的系統性殺菌劑「福賽得」(fosetyl-Al, aluminum tris-o-ethyl phosphonate, 商品名 Aliette)⁽¹⁵⁾研發成功，發現其代

謝產物中的亞磷酸離子 (HPO_3^{2-}) 為主要的抑病物質。因此亞磷酸亦被開發成農藥 (如 Foli-R-Fos 400 (20% phosphorous acid, U.I. M. Agrochemicals, Australia)⁽⁵⁷⁾) 或肥料 (如 Nutri-Phite P Foliar (4% N-30% P_2O_5 -8% K_2O , Biagro Western Sales, Inc., Visalia, CA)⁽²⁵⁾ 及 Guard P. K. (7% N-21% P_2O_5 -21% K_2O , Agrichem, Australia)) , 用於多種病害 (尤其是疫病與霜菌病) 的田間防治, 且成效卓越, 更勝福賽得。由於與其他系統性殺菌劑相比較, 亞磷酸離子在實驗室中 (*in vitro*) 抑制菌絲生長的能力很差^(12,27); 而在植物體內 (*in vivo*) 的濃度很低, 僅有百萬分之十左右 (數十個 ppm), 因此福賽得與亞磷酸的防病功效可能並非侷限於殺菌方面, 它們真正的防病機制即開始被深入探討。在此介紹亞磷酸的特性、近年來有關亞磷酸抑病機制與防病範圍的研究報導, 以及農試所研發出有關田間使用亞磷酸的便捷方法。

亞磷酸與亞磷酸鹽的特性與安全性

亞磷酸 (phosphorous acid, H_3PO_3) 為三價還原態磷化合物 (reduced phosphorus compound) 的一種, 白色結晶, 易潮解⁽¹⁴⁾, 味如大蒜, 原為植物緩效性磷肥的一種, 產於澳洲等地⁽⁴⁰⁾。水溶液的酸鹼值為 pH_2^{-3} , 會緩慢氧化成磷酸 (phosphate, $\text{H}_2\text{PO}_4^{-1}$)。若其與鹼 (如氫氧化鈉 (NaOH) 與氫氧化鉀 (KOH)) 中和, 會變化成亞磷酸鹽 (phosphite, Na_2HPO_3 同 NaH_2PO_3 , 以及 K_2HPO_3 同 KH_2PO_3)。此外, 亞磷酸鈉在醫藥上可當作輕瀉劑, 用於解二氯化汞 (HgCl_2) 中毒用, 而且可以抑制一些食物上的革蘭氏陽性 (G+) 細菌的生長⁽⁴⁸⁾。亞磷酸對人畜無毒, 實驗報告指出亞磷酸鈉在 50,000 ppm 高劑量下 (每公升含有 50 g), 對老鼠亦不會致癌⁽⁴⁷⁾, 而福賽得則對雄鼠略有致癌性⁽⁴⁷⁾。亞磷酸如被人體吸收, 會氧化成磷酸, 可成為核酸 DNA、ATP 的組成物。

亞磷酸與磷酸同為天然磷化合物, 可同時存在磷礦石中。兩者間有競爭作用^(40,25), 亞磷酸施用於土壤後可緩慢氧化成磷酸, 或施用於葉面被植株吸收後, 輸送至根部, 經細根排出至土中, 再被微生物代謝成磷酸, 成為植物主要肥料 - 磷肥, 再被植物吸收⁽⁴⁹⁾。因此施用亞磷酸有助於植物生長⁽⁴⁹⁾, 尤其對下期作的植物特別有益⁽⁴⁰⁾, 但因亞磷酸的酸鹼值太低, 在高濃度下不適宜直接當作肥料使用。

亞磷酸防治病害的機制探討

近年來國外的試驗結果顯示, 亞磷酸化合物 (phosphonate) (包括亞磷酸 (phosphorous acid, H_3PO_3) 與亞磷酸鹽 (phosphite, 如 K_2HPO_3 , Na_2HPO_3 , etc.) 均有防治卵菌類病害的優異效果^(18,25,38,41,45,54,57,58)。而福賽得 (aluminum tris-o-ethyl phosphonate) 為一種人工合成的系統性殺菌劑⁽¹⁵⁾, 殺菌成份中含有亞磷酸與鋁離子。有關福

賽得 (早年 (1977-1990) 較常被用做實驗材料) 與亞磷酸能防治病害的原因有下列多種說法:

直接保護的功效 (direct effect-disease protection): 在福賽得問世後的幾年, Fenn & Coffey^(23,24); Derck & Buchenauer⁽¹⁸⁾ 研究福賽得防治草莓疫病、番茄疫病及其他四種作物疫病; Ye & Deverall⁽⁵⁹⁾ 研究福賽得防治高苜蓿菌病, 他們的報告均指出該藥劑的主要防病功效為殺菌劑 (fungicide), 直接抑制菌絲生長, 保護寄主植物。

Muchovej 等人⁽⁴³⁾ 認為使用高劑量的福賽得會抑制菌絲生長應該是鋁離子的關係。因為 Smillie 等人⁽⁵⁴⁾ 使用高劑量的亞磷酸在魯冰 (lupin) 上 (它缺乏主動的防禦系統) 時, 不會抑制 *Phytophthora cinnamomi* Rands 的生長, 所以主張亞磷酸有直接與間接的雙重防病功效。而 Afek & Szejnberg⁽⁶⁾ 也認為亞磷酸在高濃度使用時雖有直接滅菌效果, 但無法達到完全防治病害的目的, 因此間接防病的功效不可忽視。

間接防禦的功效 (Indirect effect-plant defense): 在 1980 年代, Bompeix & Saindrenan⁽¹³⁾ 與 Guest⁽²⁶⁾ 最先認為亞磷酸鹽的防病功效並非僅殺菌而已, 應該另有主因, 就是它增強了植物的防禦能力⁽²⁸⁾。主要原因是他們^(12,26) 發現亞磷酸在植物體內的濃度僅有千分之幾莫耳 (submillimolar), 在此濃度下幾乎不會抑制疫病菌絲的生長, 然而植物病害仍然被抑制。於是, Bompeix⁽¹³⁾ 與 Vo-Thi⁽⁵⁶⁾ 等人設計實驗, 發現懸浮於福賽得溶液的番茄葉片在接種疫病菌 (*Phytophthora capsici* Leonian) 後會產生更多的酚化合物 (phenolic compounds)。接著更多學者證實亞磷酸鹽有增強植物抗病性的間接防病效果, 包括 Guest⁽²⁷⁾ 研究煙草與番椒疫病; Afek & Szejnberg⁽⁶⁾ 與 Khan⁽³⁴⁾ 等人研究柑橘疫病; Nemestothy & Guest⁽⁴⁴⁾ 研究煙草疫病; Saindrenan 等人^(50,51) 研究豇豆疫病。

亞磷酸 - 誘導植物產生抗病性

到目前為止, 在生化防禦系統上, 亞磷酸鹽的防病機制已被證實的至少有兩種以上⁽⁵³⁾, 都與改變寄主 - 病原菌的交互作用、降低兩者的親和性、進而增強植物的抗病性有關。這兩種已被發現的防禦機制, 一是活化植物之 phenylpropanoid pathway, 合成酚化合物殺菌⁽¹⁷⁾; 另一更重要的機制是活化植株之 phenylalanine ammonia-lyase pathway, 合成植物抗禦素 (phytoalexins) 與病原菌對抗^(5,6,8,27,33,34,42,44,50,53)。兩種機制均非直接靠亞磷酸來殺菌。

有關亞磷酸誘導寄主產生與累積植物抗禦素與酚化合物的報告:

豇豆 - *Phytophthora cryptogea*: 為了明瞭亞磷酸的防病效果是來自它能間接增強寄主的防禦能力 (host defense), 亦或是歸因於直接殺菌以保護植物 (plant

protection) ? Saindrenan 等人^(50,51) 利用亞磷酸鈉 ($\text{Na}_2\text{HPO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 進行兩組病原菌與寄主的試驗。他們選用寄主 - 豇豆 Cowpea (*Vigna unguiculata*) 與疫病菌 *Phytophthora cryptogea* Pethybridge & Lafferty 進行正證 (Positive evidence) 與反證 (negative evidence) 兩種試驗。在正證實驗中，他們用 2.44 mM 的亞磷酸溶液處理感病豇豆栽培種 Tvu645 葉片再接種疫病菌。結果他們發現經亞磷酸處理的葉片的病斑面積不到對照組的 20%，isoflavonoid phytoalexins 被誘導大量產生，例如 kievitone 與 phaseollidin 的累積量分別在接種後 12hr 與 40hr 時已經達到抑菌 ED_{90} 的需求量 (分別為 100 與 130 $\mu\text{g}/\text{ml}$)；而疫病菌菌絲的生長也在接種 24hr 後完全停止。因為 2.44 mM 的亞磷酸無法抑制疫病菌生長，此結果顯示病害的顯著降低與疫病菌的生長停止與植物抗禦素有關。在反證試驗中，他們在相同試驗中加入阻礙合成 phytoalexins 路徑的抑制物草酸銨 (aminooxyacetate, 簡稱 AOA)。AOA 是 phenylalanine ammonia-lyase (PAL) 的競爭物⁽⁹⁾，影響 phenylalanine ammonia-lyase pathway 的進行，阻礙 Isoflavonoid phytoalexins 的合成⁽²¹⁾。當 5mM AOA 加入試驗溶液時，無論亞磷酸處理組或是對照組均受到顯著的影響，兩組豇豆葉片的發病較原來不加 AOA 的對照組還嚴重，葉片內 PAL 的活性與兩種植物抗禦素的累積量均顯著降低，且無甚大差異；而且比未加 AOA 的對照組均低。Bompeix⁽¹¹⁾ 的實驗也證明 AOA 不會影響亞磷酸抑制疫病菌的能力。因此反證實驗也同樣證明“亞磷酸降低病害發生”與 PAL 路徑被活化導致 phytoalexins 大量累積有關。

煙草 - *Phytophthora nicotianae* : Nemkestohty & Guest⁽⁴⁴⁾ 以煙草 (tobacco, *Nicotiana tabacum*) 與煙草疫病菌 *Phytophthora nicotianae* Breda de Haan 進行類似的實驗。感病品種 Hicks 在處理福賽得 (每株 10 mg) 後再接種疫病菌，產生植物抗禦素 sesquiterpenoid phytoalexin (capsidiol, phytuberin, rishitin, 及 phytuberol) 的量增加兩倍以上 (與抗病品種的產量相仿)，病斑也顯著縮小。但是如果加入抑制劑時，phytoalexins 的產量會受到抑制，病斑大小也恢復成未經福賽得處理者。實驗發現使用不同抑制劑對誘導產生 phytoalexins 的抑制程度不同，其中以 mevinolin (phytoalexins 合成過程中，HMG CoA reductase 的專一抑制劑) 的影響最大，AOA 次之，其他抑制劑影響較小，顯示亞磷酸處理導致病害降低與誘導 phytoalexins 的產生與累積有密切的因果關係。

番椒 - *Phytophthora capsici* : Guest⁽²⁷⁾ 發現處理福賽得的番椒果實產生植物抗禦素 capsidiol 的量增加，病害減輕，果實並出現過敏性反應 (hypersensitivity)。

柑橘 - *Phytophthora citrophthora* : Khan & Ravish^(33,34) 與 Afek & Szejnberg^(5,6) 分別報告亞磷酸與福賽得會誘導柑橘產生 6,7-dimethoxycoumarin phytoalexin, scoparone 對抗疫病菌。後來 Ali 等人⁽⁸⁾ 發現處理亞磷酸的

柑橘在接種對亞磷酸敏感的 *P. citrophthora* (Smith & Smith) Leonian 菌株 (S strain) 時不會被感染，寄主產生與累積大量的植物抗禦素 scoparone；但用對亞磷酸較不敏感的菌株 (RI strain) 接種時，柑橘則會被感染，且沒有植物抗禦素的累積。如果用 AOA 處理，兩者均會感染柑橘，植物均不累積 scoparone。培養在含有亞磷酸溶液的敏感疫病菌 (S strain) 會產生 scoparone 的誘導蛋白，用它來處理柑橘後，不論疫病菌對亞磷酸是否敏感，都不能侵染柑橘，柑橘也會產生 scoparone。

草莓 - *Phytophthora fragariae* 與萵苣 - *Bremia lactucae* : Dercks & Buchenauer⁽¹⁷⁾ 發現處理福賽得的草莓與萵苣，在分別接種 *P. fragariae* Hickman 與 *B. lactucae* Regel 後，植株體內酚化合物增加，與病害防治有關。

亞磷酸活化其他生化防禦系統的報告

在上述煙草 - 煙草疫病菌試驗中，Nemkestohty & Guest⁽⁴⁴⁾ 同時用煙草抗病品種 NC2326 進行相同的試驗，發現福賽得雖然不會誘導抗病品種產生更多的植物抗禦素 (反而稍微減少)，然而，抗病品種在處理福賽得後病害亦顯著減輕。由於各種抑制劑抑制抗病品種煙草體內累積 phytoalexins 的模式與感病品種的反應十分相似，而福賽得 + 抑制劑 mevinolin (殺死植物細胞) 者的發病情形沒有比單用抑制劑 mevinolin 者的發病情形減輕，因此認為每株施用 10 mg 福賽得沒有抑制菌絲生長的能力。他們綜合實驗各項數據，認為亞磷酸除了誘導感病品種產生大量 phytoalexins 外，另外有能力誘導抗病品種活化其他的抗病機制，但其詳情尚不了解。

亞磷酸誘導抗病機制的探討

在病原菌入侵寄主，導致植物生病的一連串生化與物理反應過程中，寄主 - 病原菌的交互作用決定侵染過程是否被停止與病害發生的嚴重程度^(16,20)。寄主 - 病原菌之間存在辨識與規避機制 (recognition-avoidance mechanisms)，當病原菌無法規避被侵染植物的辨識系統 (如沒有通行證) 時，就會誘發寄主產生各種抗病反應，一般稱“病菌遇到不親和性寄主”。當然，寄主的抗病 - 感病性須依每一對寄主 - 病原菌的關係決定，而且從抗病到感病有程度上的差別。Kut⁽³⁷⁾ 的假說認為所有植物均有表現抗病性的能力，亞磷酸只是擾亂了寄主的辨識與病原菌的規避機制導致感病寄主可以辨識入侵的寄主，喚醒了它原本“沈睡的防禦潛能 (idle capacity)”。然而到目前為止，有關亞磷酸誘導寄主產生抗病反應的全程機制尚未完全了解。Dunstan 等人⁽²²⁾ 認為亞磷酸被葉片、根系吸收後，運送至植株體內，等疫病菌或其他卵菌綱病菌入侵時，亞磷酸會改變疫病菌細胞壁的水溶性成份。Barchiletto 等人⁽¹⁰⁾ 認為亞磷酸鹽可能影響疫病菌的磷酸代謝作用。Guest & Grant

(29) 認為這些代謝作用的改變，會導致病菌無法規避寄主的辨識系統，分泌過多的誘導蛋白 (elicitors)，造成寄主辨識出外來的入侵者，因此啟動生化防禦系統，誘導植物抗禦素與其他抗生物質的產生與累積^(44,51)，來圍剿消滅入侵者。Saindrenan⁽⁵²⁾ 發現亞磷酸在培養基上可以誘導 *Phytophthora cryptogea* 產生更多的誘導蛋白，因此可能改變寄主 - 病原菌的交互作用。

亞磷酸的防病範圍

亞磷酸可用於防治作物病害的對象中，以對作物疫病的研究最廣且最深 (表一)，在國外常用於柑橘腐爛病與根腐病⁽⁵⁷⁾、酪梨根腐病^(45,57)、鳳梨心腐病⁽⁵⁷⁾、木瓜疫病⁽⁵⁴⁾、可可果實疫病與潰瘍病⁽³²⁾、榴槤疫病⁽³⁸⁾、馬鈴薯晚疫病^(17,32)、番茄與番椒疫病⁽²⁴⁾、觀賞作物疫病⁽⁵⁷⁾、煙草疫病⁽⁵⁴⁾、牧草疫病^(54,57) 之防治，效果非常良好。除疫病菌外，國外亦報導亞磷酸對葡萄露菌病 (*Plasmopara viticola* (Berk et Curtis) Berl et Toni 引起)^(57,58)、萵苣露菌病⁽⁵⁹⁾、花椰菜露菌病 (*Peronospora parasitica* (Pers.) Fr. 引

起)⁽⁴¹⁾ 有良好的防治效果。葡萄染病後施用亞磷酸產品 (Foli-R-Fos) 仍可降低病菌產胞，防治葉部與花器的露菌病，效果比滅達樂還佳。此外，Heaton & Dullahide 報告⁽³⁰⁾ 亞磷酸可防治核果類的根朽病 (*Armillaria root rot*)、蘋果白紋羽病 (*Rosellinia root rot*, *Rosellinia necatrix* Prillieux 引起) 及蘋果黑星病 (apple Black spot, *Venturia inaequalis* (Cooke) Wint 引起) 等。

近年來，農試所試驗結果顯示，亞磷酸對番茄與馬鈴薯晚疫病、柳橙與木瓜果實疫病、金柑幼苗與果實疫病、酪梨幼苗根腐病、番椒與番茄疫病以及非洲菊、蘭花、百合疫病均有良好防治效果^(1,2) (表二)。對於卵菌綱中其他菌類引起的病害亦同樣有良好的防治效果，包括金線連猝倒病 (*Pythium* spp. 引起)⁽³⁾、荔枝露疫病 (*Peronophythora litchii* Chen ex Ko et al. 引起)⁽²⁾、玫瑰露菌病、葡萄露菌病 (未發表)。此外，農試所亦發現亞磷酸有防治番茄白粉病、辣椒炭疽病，及延長荔枝保鮮的效果 (未發表)。

作者的實驗結果顯示亞磷酸預防病害的效果比治療病害的效果為佳。在防治百合疫病時⁽²⁾，亞磷酸在植株體內的下移性良好，可保護種球免於感染疫病；但短期內上移

表一、亞磷酸 (1000ppm) 在台灣防治作物疫病與晚疫病、荔枝露疫病等之效果

Table 1. Control of *Phytophthora* diseases and litchi downy blight caused by *Peronophythora litchii* with phosphorous acid (1000 ppm) neutralized with potassium hydroxide (w/w:1/1) in Taiwan

Plant	Disease and pathogen	Infection site	Application method	Application schedule	Control effect (%)
Tomato, potato	Late blight, <i>Phytophthora infestans</i>	Whole plant	Foliar spray	3 times, once 1 week	80-100
Pepper, tomato	Phytophthora blight & basal stem rot, <i>P. capsici</i>	Whole plant	Foliar spray, soil trench	Continue, once per 7-10 days	60-100
Gerbera	Basal stem rot, <i>P. cryptogea</i>	Main root & basal stem	Soil trench	3 times, once 1 week	60-90
Cymbidium sp. (虎頭蘭)	Black rot, <i>P. multivestitulata</i>	Whole plant	Foliar spray	3 times, once 1 week	100
Cymbidium (報歲蘭)	Black rot, <i>P. palmivora</i>	Whole plant	Foliar spray	Inoculation, 2 month after treatment	57
Oncidium	Black rot, <i>P. palmivora</i>	Whole plant	Foliar spray	Once per month	90-95
Lily	Phytophthora blight, <i>P. parasitica</i>	Whole plant	Foliar spray	3 times, every 7 days	95-100
Papaya	Fruit rot, <i>P. palmivora</i>	Fruit	Foliar spray	3 times, every 7 days	80-100
Avocado	Root rot, <i>P. cinnamomi</i>	Seedling root	Foliar spray, soil trench	Pot test, once per month	80
Kumquat seedling	<i>Phytophthora</i> blight, <i>P. citrophthora</i>	Seedling root & basal stem	Foliar spray, soil trench	Pot test, once per month	50-100
Kumquat	Fruit and leaf blight, <i>P. citrophthora</i>	Fruit & leaf	Foliar spray	3 times, every 7 days, pot test	80-95
Litchi	Downy blight, <i>Peronophythora litchii</i>	Fruit	Foliar spray	3 times, every 7 days	>90

表二、在國外亞磷酸與亞磷酸鹽，於病害防治上的應用

Table 2. Application of products of phosphorous acid and its salts for control of plant diseases in foreign countries.

Plant	Disease	Pathogen	Treated method	Cited
Avocado	root rot	<i>Phytophthora cinnamomi</i>	Injection	45,57
Citrus	Root and foot rot	<i>P. citrophthora</i>	Trunk injection	57
Pineapple	Heart rot	<i>P. parasitica</i> & <i>P. cinnamomi</i>	Foliar spray	57
Clover pastures	Phytophthora blight	<i>P. cinnamomi</i>	Foliar spray	57
Ornamental plants	Blight, basal stem, & root rot	<i>Phytophthora spp.</i>	Foliar spray	57
Cocoa	Pod rot and canker	<i>P. palmivora</i>	Trunk injection	32
Lupin	Root rot	<i>P. cinnamomi</i>	Soil drench	54
Pawpaw	Fruit rot & seedling damping off	<i>P. palmivora</i>	Soil drench	54
Tobacco	Black shank	<i>P. nicotianae</i>	Soil drench	54
Durian	Root rot	<i>P. palmivora</i>	Soil drench	38
Potato	Tuber blight	<i>P. infestans</i>	Spray	18,28
Tomato & pepper	Crown rot	<i>P. capsici</i>	Hydroponic culture	24
Grape	Downy mildew	<i>Plasmopara viticola</i>	Spray	57,58
Lettuce	Downy mildew	<i>Bremia lactucae</i>	Spray	59
Cauliflower	Downy mildew	<i>Peronospora parasitica</i>	Spray	41
Stone fruit	Armillaria root rot	<i>A. luteobuballina</i>	Soil drench	30
Apple	Rosellinia root rot	<i>Rosellinia necatrix</i>	Soil drench	30
Apple	black spot	<i>Venturia inaequalis</i>	Spray	30

性並不佳。亞磷酸灌注土壤時，對地上部的葉片與花器疫病防治效果比直接噴施全株時的效果為差。而且亞磷酸對保護採收後果實免於罹患疫病的成效亦較差。因此，欲防治葉部或果實病害時以全株噴施亞磷酸為佳，而且亞磷酸以連續施用 3 次（每星期一次）以後，防治百合疫病的效果可達 90-95% 以上。而防範根部病害時，亞磷酸施用於植株的任何部位，均有防治根部疫病之效果，但直接灌注土壤時的效果較快速。

自行調配亞磷酸之方法

亞磷酸為強酸，因此須以強鹼物質中和至酸鹼值 pH 5.5-6.5 後使用，才不會對植物造成肥傷。農業試驗所近年來研發出一種非常簡便的方法，即將亞磷酸與氫氧化鉀以 1:1 等重量中和後即可使用⁽²⁾。方法為先將市售工業用亞磷酸 (95%) 稱重溶解於所需量的水中，再將等重的氫氧化鉀 (95-98%) 加入上述溶液中即可，混合後的溶液酸鹼值在 pH6.0-6.2 之間，最好能當日使用。

結 論

疫病菌 (*Phytophthora species*) 為植物強敵，在台灣的寄主有百種以上⁽³¹⁾，危害多種果樹、蔬菜、花卉作物，更由於台灣的氣候多雨潮濕，疫病的發生十分猖獗，尤其

近年來發生的馬鈴薯與番茄晚疫病、宜蘭地區的金柑枯死、中南部地區的酪梨根腐病、及木瓜果實疫病、園藝作物疫病等，均曾造成農民嚴重的損失。疫病的防治首重預防，田間一但發生後，病勢進展十分迅速，往往一發不可收拾，事後防治十分困難。在此介紹的『亞磷酸』防治法，它是一種防治疫病非常有效、對人畜無傷之增強植物抗病性的非農藥防治方法，也可以說是一種廣義的生物防治方法。在台灣，實驗亦顯示它對多種作物疫病與一些其他卵菌類引起的病害均有防治之功效。它不但可替代一般之化學農藥，而且可以在果實採收期間使用。

有關亞磷酸鹽的防病機制，至今仍在探討中，其防病作用包括：(1)直接對病菌菌絲生長與產胞的干擾與抑制作用。(2)誘導與加速植物抗禦素、酚化合物、其他抗病物質的產生與累積的作用。(3)前述兩者的複合作用^(28,29,50,51,54)。至於，直接與間接防病作用誰重誰輕？則受寄主 - 病原菌、亞磷酸使用量、以及環境因子的交互影響⁽²⁹⁾。有關亞磷酸誘導寄主產生抗病反應的全程機制尚未完全了解，其正確切入抗病反應路徑的位置亦待求證，但其過程可以綜合為：亞磷酸被植株吸收後，等疫病菌或其他卵菌網病菌入侵時，亞磷酸會影響疫病菌磷酸的代謝作用，改變其細胞壁的水溶性成份，使病菌產生過多的誘導蛋白 (elicitors)，導致病菌無法規避寄主的辨識系統^(10,29)，致使寄主植物發現有外來入侵者，因而啟動它的各種生化防禦系統，來圍剿消滅入侵者。

引用文獻

- 安寶貞、謝廷芳、謝美如. 1997. 利用亞磷酸防治園藝作物疫病. 植保會刊 9(4):403-404 (摘要).
- 安寶貞、謝廷芳、蔡志濃、王姻婷、林俊義. 2000. 亞磷酸之簡便使用方法與防病範圍. 植病會刊 9(4):179 (摘要).
- 張淑芬、謝式垚鈺、安寶貞. 1998. 腐霉菌屬引起之金線蓮基腐病. 植病會刊 7(4):209-210 (摘要).
- 陳昭瑩、路幼妍. 1987. 系統性誘導抗病在植物病害防治上之應用. 第 67-76 頁. 健康清潔植物培育研習會專刊. 植物病理學會刊印, 嘉義, 台灣.
- Afek, U., and Sztejnberg, A. 1986. A Citrus phytoalexin, 6,7-dimethoxy-coumarin, as a defense mechanism against *Phytophthora citrophthora*, and the influence of Aliette and phosphorous acid on its production. *Phytoparasitica* 14:26.
- Afek, U., and Sztejnberg, A. 1989. Effects of fosetyl-Al and phosphorous acid on scoparone, a phytoalexin associated with resistance of citrus to *Phytophthora citrophthora*. *Phytopathology* 79: 736-739.
- Agrawal, A. A., Tuzun, S., and Bent E. eds. 1999. Induced Plant Defenses Against Pathogens and Herbivores - Biochemistry, Ecology, and Agriculture. APS press. St. Paul. Minnesota. 390 p.
- Ali, M. K., Lepoivre, P., and Semal, J. 1993. Scoparone eliciting activity released by phosphonic acid treatment of *Phytophthora citrophthora* mycelia mimics the incompatible response of phosphonic acid-treated citrus leaves inoculated with this fungus. *Plant Sci.* 93: 55-61.
- Amrhein, N., and Gerhardt, J. 1979. Superinduction of phenylalanine ammonia lyase in gherkin hypocotyls caused by the inhibitor, L- -aminooxy- -phenyl-propionic acid. *Bioch. Biophys. Acta* 583:434-424.
- Barchietto, T., Saindrenan, P., and Bompeix, G. 1992. Physiological responses of *Phytophthora citrophthora* to a subinhibitory concentration of phosphonate. *Pest. Biochem. Physiol.* 42:151-166.
- Bompeix, G. 1989. Fongicides et relations plantes-parasites: cas des phosphonates. *Comptes Rendus de l'Academie d'Agriculture* 6:183-189.
- Bompeix, G., Fettouche, F., and Saindrenan, P. 1981. Mode d' action du phosethyl-Al. *Phytiatrie-Phytopharmacie* 30:257-272.
- Bompeix, G., and Saindrenan, P. 1984. In vitro antifungal activity of fosetyl-Al and phosphorous acid on *Phytophthora* species. *Fruits* 39:777-786.
- Budavari, S. ed. 1989. Phosphorous acid. No. 7320. in The Merck Index. An Encyclopedia of Chemicals, Drugs, and Biologicals. 11th Edition. Merck Co. Rahway, NJ.
- Cohen, T., and Coffey, M. D. 1986. Systemic fungicides and the control of oomycetes. *Annu. Rev. Phytopathol.* 24:311-338.
- Day, P. R. 1974. Genetics of Host-Parasite Interaction. Freeman, San Francisco. 238pp.
- Dercks, W., and Buchenauer, H. 1986. Investigations on the influence of aluminum ethyl phosphonate on plant phenolic metabolism in the pathogen-host interactions, *Phytophthora fragariae*-strawberry and *Bremia lactucae*-lettuce. *J. Phytopathol.* 115:37-55.
- Dercks, W., and Buchenauer, H. 1987. Comparative studies on the mode of action of aluminum ethyl phosphite in four *Phytophthora* species. *Crop Prot.* 6 : 82-89.
- Dixon, R. A. 1986. The phytoalexin response: elicitation, signaling and control of host gene expression. *Biol. Rev.* 61:239-291.
- Dixon, R. A., and Lamb, C. J. 1990. Molecular communication in interactions between plants and microbial pathogens. *Annu. Rev. Plant Physiol. & Plant Mol. Biol.* 41:339-367.
- Dixon, R. A., Dey, P. M., and Lamb, C. J. 1983. Phytoalexins: enzymology and molecular biology. *Adv. Enzymol. Rel. Areas Mol. Biol.* 55D: 1-135.
- Dunstan, R. H., Smillie, R. H., and Grant, B. R. 1990. The effects of sub-toxic levels of phosphonate on the metabolism and potential virulence factors of *Phytophthora palmivora*. *Physiol. Mol. Plant Pathol.* 36:205-220.
- Fenn, M. E., and Coffey, M. D. 1984. Studies on the *in vitro* and *in vivo* antifungal activity of fosetyl-Al and phosphorous acid. *Phytopathology* 74:606-611.
- Fenn, M. E., and Coffey, M. D. 1989. Quantification of phosphonate and ethyl phosphonate in tobacco and tomato tissues and significance for the mode of action of two phosphonate fungicides. *Phytopathology* 79: 76-82.
- Forster, H., Adaskaveg, J. E., Kim, D. H., and Stanghellini, M. E. 1998. Effect of phosphite on tomato and pepper plants and on susceptibility of pepper to *Phytophthora* root and crown rot in hydroponic culture. *Plant Dis.* 82:1165-1170.
- Guest, D. I. 1984. The influence of cultural factors on the direct antifungal activities of fosetyl-Al, Propamocarb, Metalaxyl, SN5196 and Dowco 444. *Phytopathol. Z.* 111:155-164.
- Guest, D. I. 1984. Modification of defense responses in tobacco and capsicum following treatment with fosetyl-Al. *Physiol. Plant Pathol.* 25:125-134.
- Guest, D. I., and Bompeix, G. 1990. The complex mode of action of phosphonates. *Aust. Plant Pathol.* 19:113-115.
- Guest, D. I., and Grant, B. R. 1991. The complex action of phosphonates in plants. *Biol. Rev.* 66:159-187.
- Heaton, J. B., and Dullahide, S.R. 1990. Efficacy of phosphonic acid in other host pathogen system. *Aust. Plant Pathol.* 19:133-134.
- Ho, H. H., Ann, P. J., and Chang, H. S. 1995. The Genus *Phytophthora* in Taiwan. *Acad. Sin. Mon. Ser. 15.* Taipei, Taiwan, ROC. 86 pp.
- Holderness, M. 1990. Efficacy of neutralized phosphonic acid (phosphorous acid) against *Phytophthora palmivora* pod rot and canker of cocoa. *Aust. Plant Pathol.* 19:130-131.
- Khan, A. J., and Ravise, A. 1985. Stimulation of defense

- reactions in citrus by fosetyl-Al and fungal elicitors against *Phytophthora* spp. Br. Crop Prot. Council Monog. 31:281-284.
34. Khan, A. J., Vernenghi, A., and Ravise, A. 1986. Incidence of fosetyl-Al and elicitors on the defense reactions of citrus attacked by *Phytophthora* spp. Fruits 41:587-595.
 35. Kiraly, Z., Barna, B., and Ersek, T. 1972. Hypersensitivity as a consequence, not the cause, of plant resistance to infection. Nature 239:456-458.
 36. Klopper, J. W., Tuzun, S., ehnder, G. W., and Wei, G. 1997. Multiple disease protection by rhizobacteria that induce systemic resistance-historical precedence. Phytopathology 87:136-138.
 37. Kuc, J. 1982. Phytoalexins form the Solanaceae. Pages 81-105 in: Phytoalexins. J. A. Bailey and J. W. Mansfield, eds., Blackie, London.
 38. Kuakoon, B. 1990. Efficacy of mono-dipotassium phosphite against *Phytophthoa palmivora* on durian. MS Thesis of Kasetsart Univ. 55 p. Bangkok. (English abstract)
 39. Langcake, P. 1981. Alternative chemical agents for controlling plant disease. Phil. Trans. R. Soc. London B 295:83-101.
 40. MacIntire, W. H., Winterberg, S. H., Hardin, L. J., Sterges, A. J., and Clements, L. B. 1950. Fertilizer evaluation of certain phosphorus, phosphorous, and phosphoric materials by means of pot cultures. Agron. J. 42: 543-549.
 41. Mckay, A. G., and Floyd, R. M. 1992. Phosphonic acid control downy mildew (*Peronospora parasitica*) in cauliflower curds. Aust. J. Exp. Agric. 32:127-129.
 42. Moesta, P., and Grisebach, H. 1982. L-2-Aminoxy-3-phenylpropionic acid inhibits phytoalexin accumulation in soybean with concomitant loss of resistance against *Phytophthora megasperma* f. sp. *glycinea*. Physiol. Plant Pathol. 21:65-70.
 43. Muchovej, J. J., Maffia, L. A., and Muchovej, R. M. C. 1980. Effects of ex-changeable soil aluminium and alkaline calcium salts on the pathogenicity and growth of *Phytophthora capsici* from green pepper. Phytopathology 70:1212-1214.
 44. Nemestothy, G. N., and Guest, D. I. 1990. Phytoalexin accumulation, phenylalanine ammonia lyase activity and ethylene biosynthesis in fosetyl-Al treated resistant and susceptible tobacco cultivars infected with *Phytophthora nicotianae* var. *nicotianae*. Physiol. Mol. Plant Pathol. 37:207-219.
 45. Pegg, K. G., Whiley, A. W., Saranah, J. B., and Glass, R. J. 1985. Control of *Phytophthora* root rot of avocado with phosphorous acid. Aust. Plant Pathol. 14: 25-29.
 46. Purkayastha, R. P. 1995. Progress in phytoalexin research during the past 50 years. Pages 1-40 in Handbook of Phytoalexin Metabolism and Action. M. Daniel, and R. P. Purkayastha. eds. Marcel Dekker, INC. New York.
 47. Quest, J. A., Hamernik, K. L., Engler, R., Burnam, W. L., and Fenner-Crisp, P. A. 1991. Evaluation of the carcinogenic potential of pesticides. 3. Aliette. Regul. Toxicol. Pharmacol. 14: 3-11.
 48. Rhodehamel, E. J., and Pierson, M. D. 1990. Sodium hypophosphite inhibition of the growth of selected gram-positive foodborne pathogenic bacteria. Int. J. Food. Microbiol. 11:167-178.
 49. Rickard, D. A. 2000. Review of phosphorous acid and it salts as fertilizer materials. J. Plant Nutr.23:161-180.
 50. Saindrenan, P., Barchietto, T., Avelino, J., and Bompeix, G. 1988. Effects of phosphite on phytoalexin accumulation in leaves of cowpea infected with *Phytophthora cryptogea*. Physiol. Mol. Plant Pathol. 32: 425-435.
 51. Saindrenan, P., Barchietto, T., and Bompeix, G. 1988. Modification of the phosphite induced resistance response in leaves of cowpea infected with *Phytophthora cryptogea* by alpha-aminoxyacetate. Plant Sci 58: 245-252.
 52. Saindrenan, P., Barchietto, T., and Bompeix, G. 1990. Effects of phosphonate on the elicitor activity of culture filtrates of *Phytophthora cryptogea* in *Vigna unguiculata*. Plant Sci. 67:245-251.
 53. Saindrenan, P. and Guest, D. V. 1995. Involvement of phytoalexins in the response of phosphonate-treated plants to infection by *Phytophthora* species. Pages 375-390 in: Handbook of Phytoalexin Metabolism and Action. M. Daniel, and R. P. Purkayastha. eds. Marcel Dekker, INC. New York.
 54. Smillie, R. Grant, B. R. and Guest, D. 1989. The mode of action of phosphite: evidence for both direct and indirect modes of action on three *Phytophthora* spp. in plants. Phytopathology 79: 921-926.
 55. Van Etten, H. D., Matthews, D. E., and Natthews, P. S. 1989. Phytoalexin detoxification: Importance for pathogenicity and practical implications. Annu. Rev. Phytopathol. 27:143-164.
 56. Vo-Thi, H., Bomeix, G., and Ravise, A. 1979. Role du tris-O-ethylphosphonate d'aluminium dans la stimulation des reactions de defense des tissus de tomate contre le *Phytophthora capsici*. Comptes Rendus de l'Academie des Science Paris 288:1171-1174.
 57. Wicks, T. J., Magarey, P. A., Boer, R. F. de., and Pegg, K. G. 1990. Evaluation of phosphonic acid as a fungicide in Australia. Brighton Crop Protection Conference, Pests and Diseases-1990. Vol. 1.
 58. Wicks, T. J., Magarey, P. A., Waxhtel, M. F., and Frensham, A. B. 1991. Effect of postinfection application of phosphorous (phosphonic) acid on the incidence and sporulation of *Plasmopara viticola* on grapevine. Plant Dis. 75(1): 40-43.
 59. Ye, X. S., and Deverall, B. J. 1986. Effects of Aliette on *Bremia lactucae* on lettuce. Trans. Br. Mycol. Soc. 86:597-602.
 60. Yedidia, I., Benhamou, N. and Chet. 1999. Induction of defense responses in cucumber plants by the biocontrol agent *Trichoderma harzianum*. Appl. Environ. Microbiol. 65:1061-1070.

ABSTRACT

Ann, P. J. 2001. Control of plant diseases with non-pesticide compound- phosphorous acid. Plant Prot. Bull. 10:147-154. (Dept. Plant Pathology, Taiwan Agricultural Research Institute, Wufeng, Taichung, Taiwan, R.O.C., Email:pjann@wufeng.tari.gov.tw; Fax:+886-4-3338162)

Phosphorous acid (H_3PO_3) and its salts (phosphite or phosphonate) are reduced phosphorus compounds, which could be used as a fertilizer. Many researchers were interested in the functions and the mechanisms of this kind of compounds on disease control since it was found to be very effective in controlling *Phytophthora* diseases in 1980s. Several reports, in early years, indicated that application of high concentration (>1000 ppm) of neutralized phosphorous acid could directly protect plants by inhibition and interference of the mycelial growth and sporangial production of *Phytophthora* species and other members of oomycetes. However, it was subsequently found that the indirect effect of inducing host resistance against the pathogens is a more important action contributing to the disease control. Disease reduction was found to be associated with increase in production and accumulation of phytoalexins, phenolic compounds or other antifungal substances. Currently, most researchers believe that phosphorous acid has both direct (plant protection) and indirect (host defense) modes of actions, but plant defense induced by the chemical is more important in breaking down pathogen's attack. How phosphorous acid activates the host defense reactions and which position of the pathway it effects, are still unknown. Phosphorous acid could not be directly applied to plants due to its strong acidic character (pH2-3) in water solution. It has to be neutralized to pH 5.5-6.5 with alkaline compounds such as sodium hydroxide (NaOH) or potassium hydroxide (KOH) before use. Commercialized products of phosphorous acid includes fungicide such as Foli-R-Fos 400 (20% H_3PO_3) and fertilizers such as Nutri-Phite P Foliar (4-30-8) and Guard PK (7-21-21) for diseases control. These products are commonly used for control of avocado root rot and citrus foot and root rot caused by *Phytophthora* species, downy mildew of grape, lettuce and crucifer and many other diseases caused by members of oomycetes. Recently, a simple method for phosphorous acid application was developed in our laboratory. It consists of dissolving equal amount (w/w, *i.e.* 1:1 in ratio) of phosphorous acid (H_3PO_3 , 92-95%, industry grade) and potassium hydrochloride (KOH, 92-98%, industry grade) in water. The pH of the resulting solution is about 6.0 to 6.2, which is not phytotoxic to plants. The major diseases successfully controlled in the fields with this technique in Taiwan included late blight of potato and tomato caused by *Phytophthora infestans*, blight of pepper caused by *Phytophthora capsici*, root rot of avocado caused by *Phytophthora cinnamomi*, black rot of orchid caused by *Phytophthora palmivora* and *Phytophthora parasitica*, and fruit downy blight of litchi caused by *Peronophythora litchii*.

Key words : Phosphorous acid, phosphite, induce resistance, phytoalexin, diseases control, *Phytophthora* diseases, downy mildew.