

人工模擬酸霧對三種冬季葉菜之傷害¹

姚銘輝 漆匡時 蔡金川 梁連勝²

摘要：本試驗目的主要是探討酸霧對田間種植三種冬季蔬菜（茼蒿、芥藍、菠菜）的葉片構造傷害及其生理機能障礙的影響。處理之 pH 值為 1.6, 2.6, 3.6, 4.6 及 5.6（對照組）等五種，播種後 28 天開始噴灑酸霧，經三週處理，每週噴灑 0.3 公厘霧量三次，整個生育期共 9 次處理。酸霧對三種蔬菜之傷害主要在葉片，受害最嚴重為 pH 1.6 處理，而 pH 3.6 酸度以上則無傷害。芥藍之葉面積以 pH 1.6 降低最多，但仍較同一酸度其他二種蔬菜的損失少 20%。菠菜和茼蒿在高酸度時，由於表層臘質分解使上表皮氣孔導度增高及葉片水份含量減少。測定均質葉片所測定緩衝能力的結果，以芥藍緩衝能力最強。至於其他測定包括植株高度、莖部乾物重及下表皮氣孔導度並無明顯差異。

關鍵詞：酸霧、緩衝能力、上表皮氣孔導度、下表皮氣孔導度。

近年來關於酸雨的研究報告指出，大氣中酸雨污染的酸度並不如「想像」中嚴重，例如 Chen 等人⁽³⁾自民國 79 年至 82 年四年間測定臺灣 10 個地區雨中酸度的結果，發現不論都市或郊區及內陸或海邊，雨中 pH 值皆在 4.0 以上。而在酸雨對農作物生長的研究中，pH 4.0 以上的酸度，並無法引起植物的受害^(8,16)。但粒徑較細的霧則是值得重視的問題，由於微細粒子有較大表面積，能吸附多量硝酸根及硫酸根離子，這些離子在光線和臭氧 (O₃) 作用下可形成硝酸及硫酸⁽¹⁸⁾，所以酸霧的酸度常高於酸雨 10~100 倍⁽¹⁷⁾。在美國加州洛杉磯地區發現 pH 2.9 酸霧，而在工業污染嚴重地區甚至出現 pH 1.69 的觀測報告⁽⁴⁾，歐洲地區最低酸霧值為 pH 2.5，並被認為是引起森林衰退的主因，事實上，霧的頻度和強度與森林衰退有相關性 (r=0.651)⁽⁷⁾。

酸霧的來源可分為二類：一為自然發生，如火山爆發所噴出的硫化物和懸浮固體。土壤微生物和水中藻類所釋放之硫化氫及動植物死亡後所分解的有機酸等，另一來源則為工業發展所帶來的污染的，如燃油或火力電廠、交通運輸工具所排廢氣等。當污染源的懸浮粒子形成具有吸水性的凝結核，漂浮在夜晚所形成逆溫層的大氣中，在每秒 2~3 公尺微風吹拂下，便易形成近地面的酸霧，這種霧將持續一段時間，直到太陽升高地面受熱後才逐漸消去。

至於酸霧對農作物的傷害，主要是葉表臘質的改變。葉片表層臘質及角質層的結構及型態是植物降低葉片水份蒸散至大氣中的最後防線，酸霧的酸度足以溶解或破壞葉片臘質，使水分過度蒸散而導致葉片枯萎，並產生白色或褐色斑點。酸霧中氫離子進入細胞內部消耗 OH⁻基，並降低細胞液 pH 值，pH 值改變將使細胞內生理代謝混亂。另氣孔內腔酸化將干擾光合作用酵素對光線的反應⁽⁵⁾，這將直接或間接影響葉綠素進行光合作用。

1. 臺灣省農業試驗所 研究報告第 1770 號。

2. 本所農工系助理、助理研究員、副研究員、系主任。臺灣省 臺中縣 霧峰鄉。

臺灣中南部農業生產區的霧，主要是以輻射霧為主。冬季濕空氣從廣大水面平流至陸地，到了夜晚因陸地輻射冷卻效應而形成霧。由於霧之形成受局地性之控制最顯著，所以有關霧的氣象資料取得困難，且測得資料也僅限於能見度⁽¹⁾，至於霧的強度及化學組成分並無相關資料。酸霧對農作物傷害的研究甚少，本試驗是利用人工模擬酸霧處理冬季葉菜類蔬菜，茼蒿、芥藍及菠菜等三種，茼蒿葉片則屬多肉且易脆，菠菜葉片較小且薄，而芥藍葉片較大且厚，希望藉由處理三種不同型態葉片的蔬菜，探討酸霧對冬季蔬菜的葉片傷害程度及相關生理性狀的影響。

材料與方法

本試驗自民國82年12月至83年2月於臺中縣霧峰鄉本所試驗田進行，採用三種冬季葉菜蔬菜：茼蒿 (*Chrysanthemum coronarium* L.)，芥藍 (*Brassica oleracea* L.) 及菠菜 (*Spinacia oleracea* L.)。栽培以每小區行長3公尺，畦寬1.2公尺，種植行株距為30×15公分，合每小區60株。採用逢機完全區集設計，重複四次。播種以條播方式，出土後依株距適度間拔。種植前施用肥料用量，基肥包括每0.1公頃雞糞300公斤，硫酸銨80公尺，過磷酸石灰120公尺及氯化鉀60公尺，播種後一個月施追肥每0.1公頃，硫酸銨40公尺，氯化鉀20公斤，酸霧處理前噴灑殺菌劑及殺蟲劑共四次，處理後不再噴施藥劑。

酸霧處理分pH5.6 (CK：蒸餾水)，4.6，3.6，2.6及1.6等五種，後四種配製以硝酸：硫酸=2.5：1 (莫耳比)，用手持式噴霧器噴灑，於植株上方30公分處噴灑，使霧粒自由落下，利用此種噴霧方式可減少霧粒等葉片的直接衝擊，而噴施以葉片表層完全濕潤原則。霧粒徑以水試紙測定，約為10~50 μ m。每小區每次噴施量約200毫升，約等於是0.3公厘的霧量，於清晨8時噴施，每次噴施約可維持葉片完全濕潤20分鐘，連續三週，每週3次 (每週之星期一、三及五，若遇雨天則順延一天)，整個生育期共9次，總共酸霧量為2.7公厘。

以葉片的臘質含量、病斑面積、氣孔導度、相對水份含量、緩衝能力及葉綠素含量，作為探討酸霧處理後葉片的傷害程度。測定時間除病斑面積於收穫期調查外，其他於酸霧處理後當天下午進行，共測定6次，至於各性狀之測定方法如下所述：

一、臘質含量測定，係依據 Mayeux 等人⁽⁶⁾方法修飾而成，取直徑2公分之葉圓片10片，用蒸餾水沖洗二次後加入30毫升 chloroform，在室溫下浸15分鐘，再將溶液倒入預先稱重之燒杯中，放入烘箱內以50°C烘乾後，經稱重並減去燒杯重即為臘質含量。

二、葉片病斑於收穫時測定，由同一人以目測方式判定，將所得判定分數加以平均 (n=20)，並以統計上對比方式加以分析處理間差異。

三、葉片上表皮及下表皮氣孔導度係以 LI-1600 steady state porometer (LICOR Inc. Nebraska USA) 測定，於每次噴霧處理後3~4小時測定，每小區選生長一致的葉片5片測定，將測得數據取平均值。

四、相對水份含量 (relative water content; RWC) 是將完整葉片剪下稱鮮重 (Fresh weight; FW) 後，浸於蒸餾水至完全吸水後取出，表面水分用試紙吸乾稱重即為膨壓重 (turgor weight; TW)，後將樣品烘乾稱重得乾物重 (dry weight; DW)，並依下列公式計算即得相對水分含量：

$$RWC = \frac{FW - DW}{TW - DW} \times 100\%$$

五、葉片緩衝能力測定係依據 Pfanz 和 Heber⁽¹¹⁾方法測定，取1.5至2.0克重之蔬菜葉片，用蒸餾水清流二次後，吸乾水分並加液態氮磨成粉末狀，加10毫升蒸餾水攪拌成均質水溶液。酸鹼度滴定是將均質水溶液以 KOH 調至pH10，再用0.1 N HCl 滴定，記錄 HCl 用量及pH值變化，並繪成滴定曲線圖。

六、葉綠素測定是取直徑 1 公分之葉圓片 3 片，放入試管中，加 5 毫升 95% (v/v) 酒精在黑暗中萃取 48 小時，用光電比色計在 665, 649, 470nm 波長下測吸光度⁽¹⁹⁾。

並於收穫期測定株高、葉面積及乾物重。

結果與討論

一、酸霧對葉片構造的傷害與生理機能的障礙

酸霧對葉菜類蔬菜最直接的作用部位在葉片表層 (cuticular)。表層是由果膠層 (pectin)，角質層 (cutin)，臘層 (wax) 及表層臘質層 (epicuticular wax) 所構成，可保護植物免受環境中化學及物理的傷害，及防止蔬菜體內水份的蒸散。表層的最外側為表層臘質，乃是葉表對抗酸霧及大氣污染的主要屏障。本試驗僅以表層臘質含量作為受酸霧傷害的調查對象。

由表 1 得知，三種冬季蔬菜 (茼蒿、芥藍、菠菜) 在酸度 pH 2.6 及 1.6 時臘質出現下降現象，茼蒿在兩種酸度 (pH 2.6 及 1.6)，菠菜在 pH 1.6 皆與對照 (CK) 呈現顯著性差異，芥藍則無差異，似乎種間對於酸度的感受性有差異。Olszyk⁽¹⁰⁾ 等指出酸霧對大部份植物受害酸度皆在 pH 3.0 以下。這種傷害是由於硫酸及硝酸等酸性物質能使表層臘質進行化學分解，臘質上的長鏈脂肪酸產生游離及組成結構發生改變，進而使臘質分解而破裂⁽¹⁶⁾，並造成臘質含量的減少⁽¹⁷⁾，由酸霧試驗中，臘質含量減少多寡常能反應植株受害程度。

表 1. 酸霧對茼蒿、芥藍及菠菜葉片傷害情形

Table 1. Effects of acidic fog on foliar injury of garland chrysanthemum, kale and spinach.

Treatment effect	Wax content (g/m ²)	Leaf area necrotic (%)	Leaf area (cm ²)	Relative water content (%)	Chlorophyll content (g/m ²)
kale					
pH 5.6 (C.K)	12.7a*	...	500a	93.3a	0.99a
pH 4.6	13.8a	...	516a	94.2a	1.06a
pH 3.6	12.1a	3.6a	408b	92.2a	0.99a
pH 2.6	11.7a	10.1a	386b	93.0a	1.00a
pH 1.6	10.5a	35.8b	375b	91.6a	0.90b
garland chrysanthemum					
pH 5.6 (C.K)	13.8a	...	449a	92.2a	0.61a
pH 4.6	12.7a	...	404b	91.4a	0.62a
pH 3.6	13.5a	8.8a	398b	92.0a	0.61a
pH 2.6	8.4b	17.6b	258c	87.7b	0.60a
pH 1.6	6.4b	40.2c	230c	86.1b	0.55b
spinach					
pH 5.6 (C.K)	15.9a	...	413a	87.5a	1.03a
pH 4.6	15.0a	...	417a	88.0a	1.03a
pH 3.6	13.8a	8.6a	396a	87.9a	1.00a
pH 2.6	11.8a	21.2b	250b	88.3a	0.92b
pH 1.6	7.4b	43.3c	236b	83.1b	0.73c

* Means followed by dissimilar letter within each column are not significantly different at 5% level by Duncan's New Multiple Range test.

酸霧對葉面的臘質有如此的侵蝕作用，使葉片的構造受到傷害，發生龜裂現象，甚至在葉片上產生白色或褐色的壞死組織 (necrosis)、斑點及黃化現象。葉片受害程度與 pH 值的高低有關，一般而言，農作物在 pH 3.5 以下受害，而本試驗結果如表 1，pH 3.6 時三種冬季蔬菜葉片皆出現壞死組織，且酸度愈高傷害愈嚴重，其中菠菜最嚴重。至於葉面積方面，唯茼蒿在 pH 4.6 的處理時出現減低，並與對照組有顯著性差異，這是否因葉片發生萎縮 (atrophy)，還有待研究。其他芥藍與菠菜都在

pH3.6或以下的處理，葉面積才有下降，這與壞死組織的出現情形頗為一致。因葉片構造被破壞，氣孔易為臘質所覆蓋，同時由於酸霧侵入組織內，致使保衛細胞 (guard cell) 的離子平衡被破壞，氣孔的張閉機能受阻礙。但本試驗有關酸霧處理，圖1所示，下表皮氣孔導度於不同酸度處理下並無差異，而上表皮氣孔導度在生育初期並無差異，茼蒿及菠菜則在pH2.6及1.6處理下於生育後期（播種後44及48天）則有昇高現象。

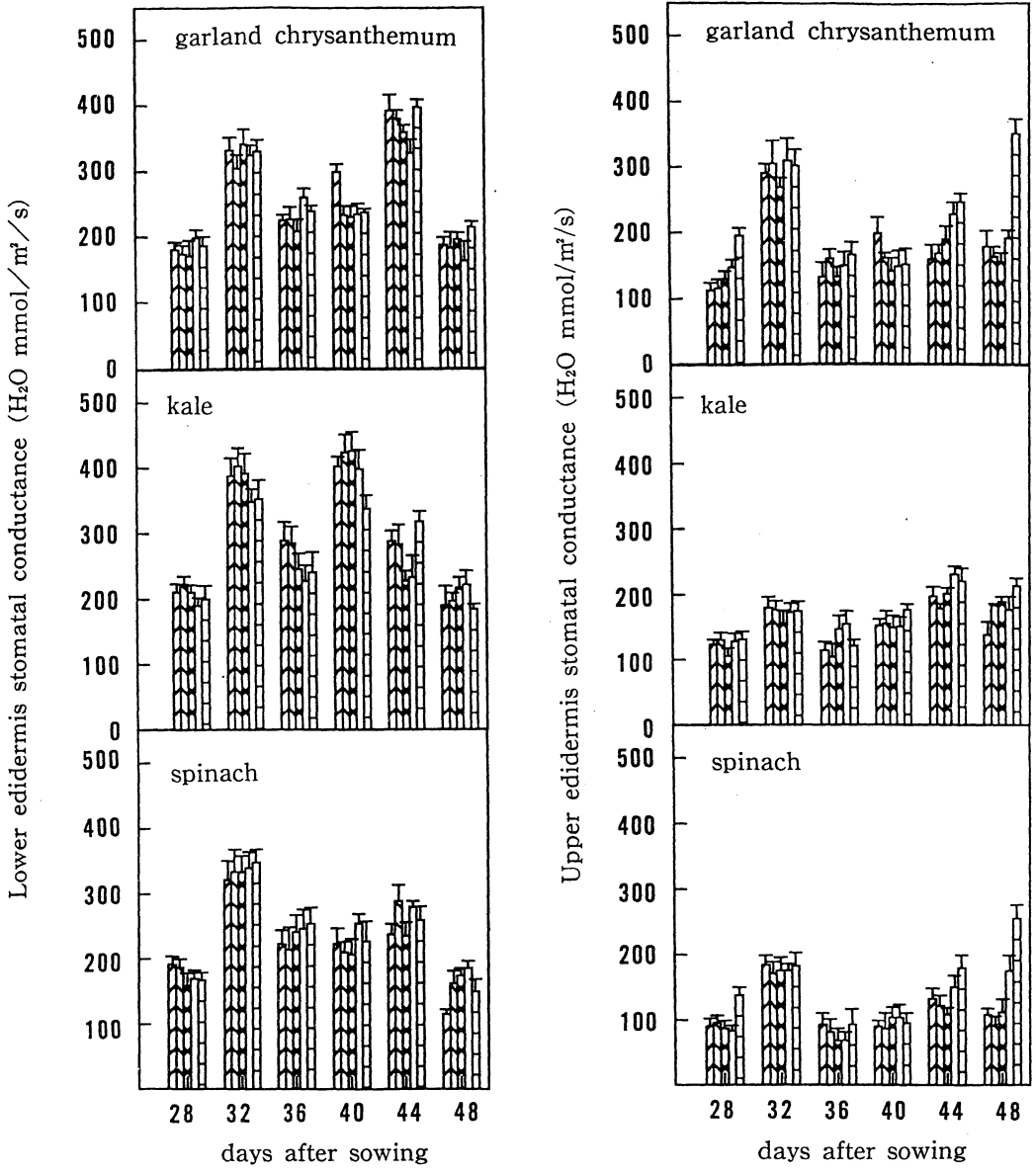


圖 1. 不同酸霧處理下葉片氣孔導度及表層導度變化情形

Fig. 1. Influence of different acidic fog treatments on lower and upper epidermis stomatal conductance. Bars indicated the standard error.

綜合這些葉片構造受傷害及機能受阻礙的情形，植物體的水分狀態會有惡化，及對病蟲害的抵抗性亦會減低的可能。由試驗結果（表 1）得知，茼蒿在 pH2.6 及 1.6 之處理下，相對水份含量（%）出現下降並呈顯著性差異，芥藍與菠菜則於 pH1.6 的處理亦有降低，唯後者有顯著性差異。植物體光合作用不可缺的綠色色素即葉綠素，茼蒿及芥藍在 pH1.6 的處理，菠菜於 pH2.6 及 1.6 之處理下其葉綠素的下降呈現顯著性差異。而這些因高酸度的處理而降低葉綠素含量是否影響光合作用能力，本試驗無測定，唯從光合作用的最終產物營養器官（葉、莖）的乾物重變化作探討。

Adams 等人⁽²⁾用不同 pH 值的酸雨（pH5.6, 3.6, 3.0）分別處理三種植物葉片，發現停留在葉片表面上的雨滴 pH 值在處理 75 分鐘後逐漸上昇，另一方面，植物表層臘質部份的 pH 值則有下降現象，顯然葉片表面的分泌物質可中和酸度，也就是葉片本身對酸雨具有緩衝能力（buffering capacity）。為了解物種間對酸霧的緩衝能力，將等重量的蔬菜葉片，經研磨後加蒸餾水使均質，再用稀鹽酸滴定，繪成滴定曲線（圖 2），由圖中可知在 pH5.5 至 3.5 間，芥藍對酸性緩衝能力最強，其次

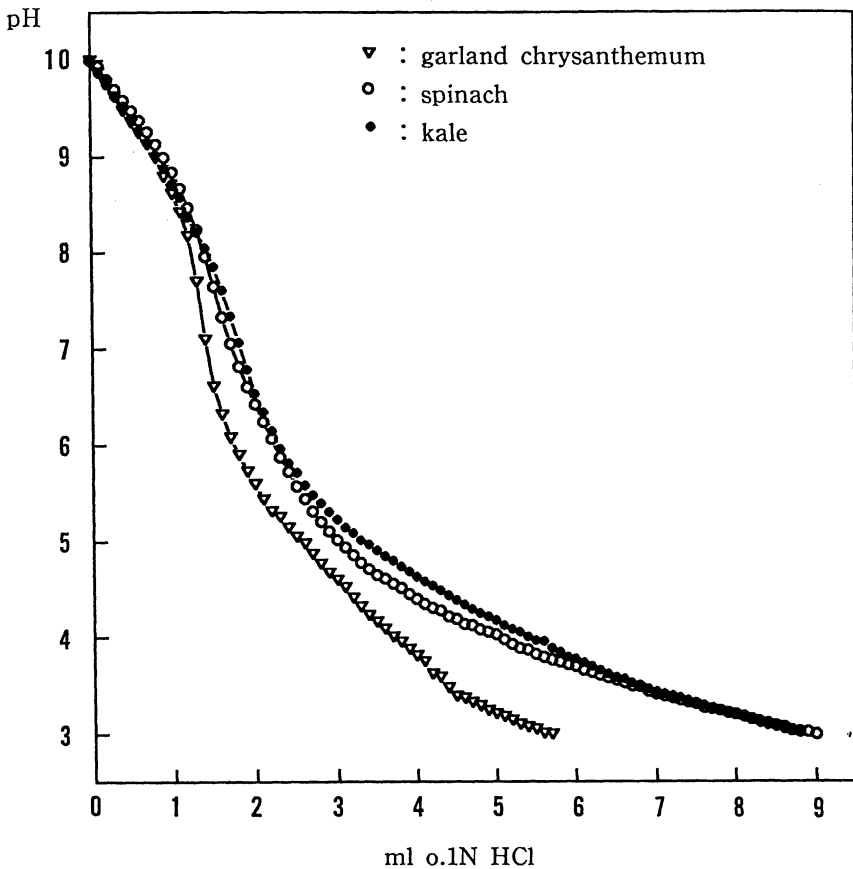


圖 2. 茼蒿、芥藍及菠菜均質液之滴定曲線

Fig. 2. Titration curves of homogenates of garland chrysanthemum, kale and spinach leaves.

為菠菜及茼蒿。上述表 1 在 pH1.6 時臘質、葉綠素及相對水份含量，芥藍皆居高，其次是菠菜及茼蒿，而壞死葉面積亦是芥藍最小，表示芥藍對酸霧具有較強的抵抗力，這意味著蔬菜對酸霧抵抗力有種間差異，與酸霧的緩衝能力種間差異頗為一致。事實上由於葉片各組織及細胞間緩衝能力並不相同^(11,14)，利用此方法是打破細胞間格位 (intracellular compartmentalization) 直接測定細胞液 (cell sap) pH 值的方式⁽¹⁵⁾，雖然不能代表細胞質內 pH 值，但卻是對外界反應 pH 值最常用且簡單的方式⁽⁶⁾，另細胞液 pH 通常低於 5.5，其中緩衝物包括 bicarbonate, phosphate compounds 和有機酸等，是決定緩衝能力大小的重要因子⁽¹¹⁾。是否可應用於蔬菜育種作篩選抗酸霧較強的品種還需進一步研究。

二、酸霧對株高及葉、莖之乾物重的影響

基於上述酸霧對三種冬季蔬菜葉片構造之傷害，其生理機能受到障礙。如臘質、葉面積、葉綠素、相對水份含量的減少，及壞死葉面積的增大等。這些原因當會影響光合作用的最終產物乾物重或產量。由表 2 得知，三種蔬菜的葉片乾物重在 pH2.6 及 1.6 處理後有顯著性減少趨勢。這亦與 Olszyk 的報告⁽¹⁰⁾酸霧對大部份農作物受害酸度皆在 pH3.5 以下，而導致產量減少者 pH 值大都在 2.0 以下，頗為相似。另茼蒿及芥藍 pH4.6 處理之葉片乾物重較對照組 pH5.6 高，此與大豆及豌豆的研究有相似結果^(8,15)，乃田間酸霧可提供額外的硝酸態氮 (nitrates) 和硫肥 (sulfates)，雖然所提供僅微量，但卻有助於植物短期生長之用。至於莖部乾物重及株高，雖菠菜在 pH1.6 的處理與對照組出現顯著性差異，其餘處理大部份無明顯差異。

表 2. 酸霧對茼蒿、芥藍及菠菜生長之影響

Table 2. Effects of acidic fog on garland chrysanthemum, kale and spinach growth.

Treatment effect	Leaf dry wt. (g)	Stem dry wt. (g)	Plant height (cm)
kale			
pH 5.6	2.07a*	1.33a	29.9a
pH 4.6	2.44a	1.31a	28.1a
pH 3.6	1.63b	1.32a	27.2a
pH 2.6	1.54b	1.26b	25.8a
pH 1.6	1.51b	1.08b	24.8a
garland			
chrysanthemum			
pH 5.6	0.94a	0.42a	14.0a
pH 4.6	1.44b	0.41a	15.5a
pH 3.6	0.88b	0.42a	16.1a
pH 2.6	0.65c	0.36a	13.4a
pH 1.6	0.59c	0.38a	13.0a
spinach			
pH 5.6	1.34a	1.23a	28.6a
pH 4.6	1.28a	1.06a	26.6a
pH 3.6	1.24a	0.99ab	25.2a
pH 2.6	1.05a	1.05bc	22.9ab
pH 1.6	0.83b	0.90c	20.1b

* Means followed by dissimilar letter within each column are not significantly different at 5% level by Duncan's New Multiple Range test.

結 論

本試驗各項結果顯示：處理酸度在pH2.6以下才有受害徵狀，而三種葉菜類蔬菜間以葉片較厚的芥藍最具耐酸性，茼蒿及菠菜則對酸霧較為敏感。酸霧的傷害主要以葉片為主，包括斑點的產生及表層臘質的減少，斑點產生使葉綠素含量減少，將影響光合作用進行；臘質減少則上表皮氣孔導度增加，水份由葉表蒸散量增大，使葉片水份含量減少，至於下表皮氣孔導度在試驗測定中並無差異，顯然酸霧的傷害是直接集中在葉片上表皮。三種蔬菜間對酸霧氫離子的緩衝能力並不相同，芥藍所需滴定量較其他二種蔬菜多，表示芥藍的耐酸性除受葉片型態影響外，葉片表層的組成物及內含物對減少酸霧傷害也具有重要性。

誌 謝

本研究之化學分析部份，承蒙本所農藝系劉大江博士慨允提供儀器及場地使試驗得以順利進行，謹此致謝。

引用文獻

1. 陳孟青、戚啓勳。1988。初步探討臺灣之霧。氣象學報 34：308—314。
2. Adams, C. M., N. G. Dengler, and T. C. Hutchinson. 1984. Acid rain effects on foliar histology of *Artemisia tilesii*. Can. J. Bot. 62 : 463—474.
3. Bhen, J. H., K. H. Chang, and F. T. Jeng. 1993. The acid rain in Taiwan area. International conference on regional environment and climate change in East Asia. Taipei. Taiwan. RPC. p. 28
4. Hileman, B. 1983. Acid fog: New findings widen the range of acid deposition phenomena. Envir. Sci. Technol. 17 : 117—120.
5. Leegood, R. C., Y. Kobayashi, S. Neimanis, D. A. Walker, and U. Huber. 1982. Cooperative activation of chloroplast fructose 1.6-biphosphatase by reduction, pH and substrate. Biochem. Biophys. Acta. 682 : 168—178.
6. Mayeux, J. R., W. R. Jordan, R. E. Meyer, and S. M. Meola. 1981. Epicuticular wax on goldenweed (*Isocoma* spp.) leaves: variation with species and season. Weed Science. 29 : 389—393.
7. Mengel, K., A. M. R. Hoglebe, and A. Esch. 1989. Effects of acidic fog on needle surface and water relations of *Picea abies*. Physiol. Plant. 75 : 201—207.
8. Mengel K., M. Th. Breininger, and H. J. Lutz. 1990. Effect of simulated acidic fog on carbohydrate leaching, CO₂ assimilation and development of damage symptoms in young spruce trees (*Picea abies* L. Karst) .Envir. Exp. Bot. 30 : 164—173.
9. Musselman, R. C. and J. U. Sterrett. 1988. Sensitivity of plants to acidic fog. J. Env. Qual. 17 : 329—333.
10. Olszyk, D. M., A. Bytnerowicz, and B. K. Takemoto. 1989. photochemical pollution and vegetation: Effects of mixture of gases, fog and particles. Environmental Pollution. 61 : 11—29.
11. Pfanz, H. and V. Heber. 1986. Buffer capacities of leaves, leaf cells, and leaf cell organelles in relation to flux of potentially acidic gases. Plant Physiol. 81 : 597—602.
12. Pylypec, B. and R. E. Redmann. 1984. Acid-buffering capacity of foliage from boreal forest species. Can. J. Bot. 62 : 2650—2653.
13. Riding, R. T. and K. E. Percy. 1985. Effect of SO₂ and other air pollutants on the morphology of epicuticular waxes on needles of *pinus strobus* and *pinus banksiana*. New Phytol. 99 : 555—563.
14. Smith, C. R., B. L. Vasilas, W. L. Banwart, D. B. Peters, and W. M. Walker. 1990. Lack of physiological

- response of two corn hybrids to simulated acid rain. *Envir. Exp. Bot.* 30 : 435—442.
15. Smith, F. A. and J. A. Raven. 1979. Intercellular pH and its regulation. *Annu. Rev. Plant. Physiol.* 30 : 289—311.
 16. Temple, P. J. 1988. Injury and growth of jeffrey pine and giant sequoia in response to ozone and acidic mist. *Envir. Exp. Bot.* 28 : 323—333.
 17. Turunen, M. and S. Huttunen. 1990. A review of the response of epicuticular waxes of conifer needles to air pollution. *J. Env. Qual.* 19 : 35—45.
 18. Waldman, J. M., J. W. Munger, D. J. Jacob, and M. R. Hoffmann. 1982. Chemical composition of acid fog. *Science.* 218 : 677—680.
 19. Winterman, J. H. and A. DeMots. 1965. Spectrophotometric characteristics of chlorophyll and their pheophytins in ethanol. *Biochem. Biophys. Acta.* 109 : 448—453.

Damage on Three Leafy Vegetables in Winter by Simulated Acidic Fog¹

Ming-Hwi Yao², Kung-Shy Chi², Jin-Chuan Tsai² and Lien-Sheng Liang²

Summary

The primary objectives were to determine the acidic fog stress cause alternation in the vegetables growth, physiological and foliar injury responses. Field plots of garland chrysanthemum (*Chrysanthemum coronarium* L.), Kale (*Brassica oleracea* L.) and spinach (*Spinacia oleracea* L.) were exposed to three 0.3mm simulated fog episodes per week at specific acidities from pH 1.6, 2.6, 3.6, 4.6 and 5.6 treatments. For all three vegetables, foliar injury was assessed to determine damage response levels, The most severe injury occurred near pH 1.6, and no injury was observed above approximately pH 3.6, Decrease of leaf area of kale was also most severe at pH 1.6 but was approximately 20% less severe than those of spinach and garland chrysanthemum at this acidity. In spinach and garland chrysanthemum, highly acidic fog enhanced upper edidermis stomatal conductance and depressed relative water content via the disintegrated of the epicuticular wax layer. Homogenates of leaves were titrated and buffer capacities were determined as a function of pH, kale, as the most alkaline leaf. There were no detectable effects of acidity on plant height, stem dry weight and lower adidermis stomatal conductance.

Key words : Acidic fog, Buffering capacity, Upper edidermis stomatal conductance, Lower edidermis stomatal conductance.

1. Contribution No. 1770 from Taiwan Agricultural Research Institute.

2. Respectively, Assistant, Assistant Researcher, Associate Researcher, Head, Department of Agricultural Engineering, TARI, Wufeng, Taichung, Taiwan, ROC.