

植物生長與養液要素之關係

沈 再 發*

一、前 言

高等植物的必需元素16種。其中H、C、O主要來自大氣或水。其他13種元素N、K、Ca、Mg、P、S、Fe、Mn、B、Zn、Cu、Mo、Cl，來自肥料吸收，是為養液組成的對象。廣義的無土栽培，包括水耕、噴霧耕和固體介質耕（砂耕、礫耕、岩綿耕等）。多年來許多研究者發表很多的培養液組成，Hewitt（1966）列出160種配方。其全離子濃度、離子間比率、氮的形態、鹽類的組成等，也有所不同。自Hoagland配方發表後，很多再修正的養液配方出現。日本園藝試驗場的均衡培養液也廣泛應用。養液栽培農戶有自行向化學原料行購買肥料自行調配的，也有購買已調配完成的肥料或養液行栽培的。無論自行調配或購買現成養液，都有需瞭解要素與生長之關係及肥料鹽種類、特性等。

二、要素與生長

有關各元素在植物體內的功能並非完全絕對的了解，但植物對其生長的反應，可用來判斷植物的缺乏或過剩症、栽培作物所需的要素量、和何種化學鹽來調配培養液。

氮（N）

氮是兩種最大量元素之一，生長中的植物消耗量大。由於植體內易移動，生長中的嫩葉可由老葉獲得氮素。缺乏症狀時全株可出現，其中以成熟葉最先出現症狀。

氮的供給型態可分成 $\text{NO}_3\text{-N}$ 及 $\text{NH}_4\text{-N}$ 兩種；大部分的培養液只含 $\text{NO}_3\text{-N}$ ，因 $\text{NH}_4\text{-N}$ 對植物有害。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的來源有硝酸鉀或硝酸鈣，少量的氮可由硝酸供給並藉以調整養液中的pH。

$\text{NO}_3\text{-N}$ 由根部吸收後，通常使培養液的pH提高（呈鹼性），同時又因根部 HCO_3^- 被放出進入培養液中，故培養液pH值更上升。因此，必需定期的加酸來調整。於日照充足時，作物之生長快而氮吸收愈多，所需加酸調整pH的次數也愈多。

鉀（K）

在高光度下吸收量多，鉀由根吸收後，隨著蒸散流在體內移動，故蒸散量大時，鉀吸收也多。缺乏時症狀首先出現於下位葉，過多的鉀則會阻礙鎂及鈣的吸收。

鉀肥通常施用硝酸鉀（同時供給氮）或磷酸鉀（同時供給磷）。硫酸鉀的價格最低，但因會提高培養液中硫的含量，只能偶而施用。

鈣（Ca）：

鈣由根吸收後，隨著蒸散流在植體內移動，水經由氣孔蒸散後，鈣蓄積於葉上而不易再移動。因此生長旺盛的部位出現缺乏症狀時，老葉中却含有大量的鈣。番茄尻腐病（blossom end rot），萵苣的頂燒病（tip burn）都是由於缺鈣所引起。由於鈣的轉運與環境習習相關，因此培養液中即使含有豐富的鈣，也常會有缺乏症狀出現。

* 農試所鳳山熱帶園藝試驗分所分所長

硝酸鈣溶解性高、價格低，且同時供給氮素，為最好的鈣供給源。如果氮以硝酸鈣為主要來源，由於植物體需要的氮多，所以培養液中鈣的含量常有過剩的現象。過多的鈣會阻礙鉀和鎂的吸收，而造成養液全鹽濃度間之不平衡。

鎂 (Mg) :

鎂在植體內和鉀相類似易於移動。缺乏時症狀首先發生於下位葉。鎂的主要供給源為硫酸鎂。施用過多的硫酸鎂會阻礙鉀或鈣的吸收，且也可能造成硫的超量累積。

磷 (P) :

磷在植體內也易於移動，缺乏時全株都會出現症狀。磷在水耕栽培中比其他大量元素需要量少，但土壤中由於磷常為土壤固定，需要大量施肥。磷通常與鉀一起施用，如磷酸-鉀 (KH_2PO_4)，其價格雖高，但溶解度大。另外磷亦可由調整 pH 的磷酸中獲得。

硫 (S) :

植物對硫的需求量比其他要素為少。大部份以硫酸鎂施用。因其吸收量少，施用過多時常造成養液中硫的過量累積。雖然硫對植物體沒有直接的傷害，但會干擾實際施肥上養液中全鹽的濃度。

鐵 (Fe) :

鐵為微量元素的一種，當培養液呈微鹼性 (pH 7) 時，其溶解度下降，而無法被吸收利用。由於經一段栽培後培養液之 pH 易提高，所以作物常有缺鐵發生，番茄的水耕最易發生此現象。過量的錳也會阻礙鐵的吸收。

要解決缺鐵的問題必需準確的控制 pH 值。鐵的供給源以硫酸亞鐵最便宜，但易受培養液 pH 影響。另外螯合鐵 (chelated form of iron) 對 pH 之適應範圍較廣，目前為最廣泛的。於水質良好的地區可以用 EDTA-Fe，如果水中含有較多石灰質者，則以 DTPA 或 EDTA-Fe 較好。

錳 (Mn) :

錳的吸收利用亦受養液中的 pH 控制。錳的有效率隨著 pH 值的升高而下降。然而不同於鐵者；為除非相當高的石灰質時否則不使用價格昂貴的螯合錳。平常則施用價格低，溶解度高的硫酸錳。氯化錳也可使用。因其用量甚微量，其所含之氯或硫量並不致發生影響。

硼 (B) :

植物對硼需求量少，且水源中常含有硼，所以水耕栽培時不易缺硼。當番茄結果量多時可能缺硼，其症狀為在果皮表面產生同心圓的龜裂 (concentric cracks)。番茄及胡瓜如發生硼毒害時則由下部葉開始，若水源中硼不足，可加入硼酸補充。

鋅 (Zn) :

鋅主要供給源為硫酸鋅或氯化鋅，若水源中含石灰質則以螯合物供給。尤須注意培養液貯放在鍍鋅的水槽中時易發生鋅毒害。

銅 (Cu) :

銅主要供給源為硫酸銅 (CuSO_4) 或氯化銅 (CuCl_2)，水源中含石灰質時以螯狀物補充。培養液中銅濃度不當時，成熟的番茄果實易發生裂果，尤其在氣溫高時更易發生。

鉬 (Mo) :

水源中鉬不足時，以鉬酸鈉或鉬酸銨補充之。

三、養液濃度

培養液的設計因作物種類、栽培地區而異；培養液的配方很多，表一中為常用於無土栽培之標準液濃度配方。

表一 常用於無土栽培之標準液濃度 (ppm)

要素	美國 Hoagland and Arnon	英國 Cooper	荷蘭 Modified Stelner	美國 Wilcox 1	美國 Wilcox 2	加拿大 Resh	日本 園試場
N	210	200	171	132	162	175	132
P	31	60	48	58	58	65	42
K	234	300	304	200	284	400	314
Ca	160	170	180	136	136	197	162
Mg	48	50	48	47	47	44	48

不同的培養液配方有相同點存在；例如：磷、鎂及大部分的微量元素使用濃度相似。由 Hoagland 和 Arnon 首先發展的番茄培養液處方曾被應用多年的基本無機營養研究。日本堀裕和山崎以胡瓜的肥料吸收量，發展為日本園藝試驗場均衡養液處方。Cooper 配方發展為英國養液槽法 (NFT) 番茄的供給理想配方。Wilcox—1 為由 lettuce 及番茄小苗發展而來，番茄進入結果階段，培養液中增加氮及鉀含量，即為 Wilcox—2 配方。而且鉀增加量比氮為多。Resh 於蔬菜之水耕專書內收集多種養液組成濃度。Steiner 以陰陽離子總濃度及比例修正，稱之為“通用配方”，實際係配製養液的通用方法。

優良的培養液配方決定於作物的種類與品種、栽培的型式及環境如光、溫度等的影響。許多的研究者仍繼續發展更能適合作物的處方，而作物本身也具有相當廣泛的忍受濃度範圍。Steiner 指出植物具有選擇吸收元素的能力，在濃度範圍內，不會吸收不必需的元素。

NFT 似乎可忍受培養液範圍較大，此證明流動式的系統比靜止式系統對濃度適應之彈性較大。然而要素間的平衡界限比實際的單一濃度要求更要重視。例如 Cooper 推薦用錳 2ppm，此濃度下如鐵濃度少於 12 ppm 的話，可能造成許多作物超過錳的忍受範圍。若 Resh 配方用鐵 2ppm 同時以 Cooper 的錳 2ppm 濃度時，將會發生錳毒害或鐵缺乏。其他有關相互作用上鈣、鎂、鉀間的關係亦非常重要，如果其中任何一個含量過高而造成不平衡，亦可能發生缺肥現象。定期檢查並依配方補充所需量，或更新培養液皆可避免此不平衡的發生。

在循環系統作物栽培經一段時間後，由於培養液成分的改變，可能發生元素不足、過多、或元素間不平衡的現象。此有賴定期檢查而依其處方濃度補充使其維持所適合範圍內。如果養液中之元素濃度累積到不可忍受而難調整地步，只好行養液的全部更新。

四、肥料鹽的種類

每一種元素使用的鹽類種類需隨著水質而異。例如水中含大量的鈣，則氮供給源最好用硝酸

鉀 (KNO_3) 多於硝酸鈣 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 。水中如含有一些微量元素的話，其所含有的施用量也得降低。

不管農家自行調製或廠商混合後供農家使用，其肥料量得依作物種類、栽培系統、水質及鹽類的價格而異。表二為數種常用養液大量要素的肥料鹽種類及鹽類的價格。

表二 主要肥料之分子式、分子量、溶解度、純度與價格表

肥 料	分子式	分子量	可吸收 養分形態	溶解度 ($20^\circ\text{C g}/\ell$)	純度%	價格 元/公斤
硝 酸 鉀	KNO_3	101	$\text{K}^+, \text{NO}_3^-$	315	95	30
硝 酸 鈣	無水鹽 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 結晶 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	236	$\text{Ca}^{2+}, 2(\text{NO}_3^-)$	1270	90 70	45
磷酸一鉍	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	115	$\text{NH}_4^+, \text{H}_2\text{PO}_4^-$	365	98	40
硫 酸 鎂	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	246	$\text{Mg}^{2+}, \text{SO}_4^{2-}$	252	45	15
硝 酸 鉍	NH_4NO_3	80	$\text{NH}_4^+, \text{NO}_3^-$	655	98	31
硫 酸 鉍	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	132	$2(\text{NH}_4^+), \text{SO}_4^{2-}$	754	94	4.6
氯 化 鉍	NH_4Cl	53	$\text{NH}_4^+, \text{Cl}^-$	1630		12
尿 素	$(\text{NH}_2)_2\text{CO}$	60	NH_4^+	1000	98	5.6
硫 酸 鉀	K_2SO_4	174	$2\text{K}^+, \text{SO}_4^{2-}$	111	90	31
氯 化 鉀	KCl	74	K^+, Cl^-	265	95	4.8
氯 化 鈣	$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	147	$\text{Ca}^{2+}, \text{Cl}^-$	536	75	12
磷酸一鉀	KH_2PO_4	136	$\text{K}^+, \text{H}_2\text{PO}_4^-$	227	98	60
EDTA 鐵	Fe-EDTA	421	Fe^{2+}	421	12.5	340
硼 酸	H_3BO_3	62	B^{3+}	46	18.0	23
硫 酸 錳	$\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	223	$\text{Mn}^{2+}, \text{SO}_4^{2-}$	500	99	30

氮素常以硝酸鈣 [$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$] 及硝酸鉀 (KNO_3) 為兩種鹽類來源。許多培養液也使用磷酸一鉍供給小部份的氮，用氮態氮後可減少硝酸態氮的加入並同時供給磷肥。但如果 $\text{NH}_4\text{-N}$ 供給總 N 量超過10%以上則可能發生毒害；如番茄的尻腐病 (blossom end rot) 或萵苣之頂燒病 (Tip burn) 等的發生。

磷通常由磷酸一鉀補充 (KH_2PO_4)，其溶解度雖高，但價格太貴；磷酸一鉍 ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$) 價格較低，但要注意 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量，以避免發生氨毒害。

鉀可由硝酸鉀 (KNO_3) 供給，不足者由 KH_2PO_4 補足。若認 KH_2PO_4 太貴，開放式系統 (指以滴灌方法) 養液不回收者可用價格較低的硫酸鉀 (K_2SO_4)，而循環式系統則必需注意硫的累積量。

鎂大部分以硫酸鎂 (MgSO_4) 供給，如在循環式系統下必需注意養液中硫的累積，也可考慮以硝酸鎂 [$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$] 供給鎂及氮，以避免硫害。

硫通常由含鎂或鉀鹽的肥料。而發生硫的過多遠於過少。尤其是水中本來就含有硫者，更易有過多現象。

其他如水中含大量硫而不含氯時，則鎂改施氯化鎂 (MgCl_2)，若水中含高量的硫，則可用磷酸鎂。硝酸鈉 (NaNO_3) 可補充部分的氮，但總鈉含量必需低於30-50ppm，最便宜者可用硫酸鉍或硝酸鉍，但是因其含有鉍的存在，許多的研究者為顧及其傷害，寧可不用，以避免危害。還有氮源常來自於硝酸，以減少硝酸鈣的使用量，可避免循環式系統中鈣含量過高。但硝酸

具有腐蝕性，使用時必需注意。

磷最便宜的供給源為過磷酸鈣，但因溶解度低，所以少用。最佳磷源為磷酸，其腐蝕性較硝酸為低且易操作，為許多研究者所推薦的。

表三 數種常用養液大量要素的肥料鹽種類

	KNO ₃	Ca(NO ₃) ₂	KH ₂ PO ₄	K ₂ SO ₄	MgSO ₄	Mg(NO ₃) ₂	NH ₄ H ₂ PO ₄
Hoagland 1	✓	✓	✓		✓		
Hoagland 2	✓	✓			✓		✓
日本園藝	✓	✓			✓		✓
Wilcox	✓	✓	✓	✓	✓		
Wye	✓	✓	✓	✓		✓	

上所表三所列肥料鹽的處方，大致用四種類或五種類鹽，也有用六種類鹽調製的。鹽類選擇之順序可歸納如下：

- ①磷酸選取容易溶解的鹽類，依陽離子結合 $K^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+}$ 的順序。先以 KH₂PO₄ 施用，再考慮 Ca(H₂PO₄)₂·H₂O，Mg(H₂PO₄)₂·3H₂O。而 NH₄H₂PO₄，則需留意銨的含量。
- ②鈣鹽則 NO₃⁻ > SO₄²⁻ 的順序選擇。即優先選用 Ca(NO₃)₂·4H₂O。
- ③鎂鹽則以 SO₄²⁻ > NO₃⁻ 的順序選擇。優先利用 MgSO₄·7H₂O。
- ④NO₃⁻ 則將上述鈣鹽所施 Ca(NO₃)₂·4H₂O 之含氮量扣除外，用 KNO₃ 來補足。
- ⑤鉀則以 KNO₃ 為主，不足時再以 K₂SO₄ 補足。

參考文獻

1. 山崎肯哉 1986 養液栽培全篇 日本博友社 P28-80。
2. 王銀波 1989 培養液的化學性及其管理 養液栽培講習會專刊 第二輯 60-68。
3. 沈再發、許淼淼 1989 作物的營養特性及影響養液組成之因素 養液栽培講習會專刊 第二輯 44-59。
4. Cooper, A. 1979. The ABC of NFT. Grower Books, 49 Doughty St., London, Great Britain, WCINZLP 181pp.
5. Gerber, J. M. 1985. Plant growth and nutrient formulas. Hydroponics Worldwide. Editor by Adam J. Savage. p.58—69.
6. Hewitt, E. J. 1966. Sand and water culture methods used in the study of plant nutrition. Technical Comm. No.22. Commonwealth Agri. Bureau, Farnham Royal, Bucks. England.
7. Resh, H.M. 1978. Hydroponics Food Production. Woodbridge press publishing Co. Santa Barbara, CA, 93111, 287pp.