專題報導

培養液組成之理論和實際(上)

前種苗改良場場長 沈再發

一、培養液的概念

養液栽培之培養必需元素的條件有幾種：(一)作物之必需元素都包括在內。(二)植株根容易吸收而溶解於水中，是水中離子的形態。(三)各離子濃度適當且總離子濃度也適當。(四)不含對作物有害的離子在內。(五)培養液之pH為5.5~6.5之範圍內或在其左右。(六)肥料之溶解度高且價格便宜。(七)栽培期的濃度各元素的比率、pH等的穩定或變化少。

作物之無機營養包括由空氣中吸收的二氧化碳(CO_2)、氧(O_2)以及由根吸取的水(H_2O)，和溶解於水中離子形態的氮(N)、磷(P)、鉀(K)、鈣(Ca)、鎂(Mg)、硫(S）六種大量元素；鐵(Fe)、硼(B)、錳(Mn)、銅(Cu)、鋅(Zn)、鉬(Mo)、氯(Cl)等七種微量之元素。其他矽(Si)、鈉(Na)、鋁(Al)雖也被作物所吸收，但僅對某些特定作物吸收具有生育良好作用，也列在特殊成分元素（表一）。其主要構成肥料之分子式、分子量、可吸收養分形態、溶解度、純度和價格如（表二）。

二、培養液全離子濃度、滲透壓和導電度關係

培養液濃度是以全離子濃度(單位是mg/L、mM等)或滲透壓(單位是大氣壓，即atm)等來表示。實用上以電導度(EC，單位是m mho/cm或mS/cm)較方便。以稀薄溶液將全離子溶解時其離子濃度和滲透壓其間的關係如次：

$$OP = 0.0224CT$$

OP為滲透壓(單位為atm)，C為離子濃度(單位為mM)，T為絕對溫度(單位為K，等於攝氏溫度加273，如25° C＝298K)。

溶液的滲透壓在OP和電導度EC間的關係如下(Jones1983)：

$$OP = 0.28\text{-}0.36EC,$$

$$EC = -(OP-0.28)/0.36$$

Hoagland培養液或日本園藝處方屬於均衡培養液，假設其全濃度為1單位，使用時一般以單位量表示使用的濃度，例如當植株幼小時可以不必使用全濃度，我們可以用1/2單位或1/4單位，也就是用50％或25％濃度，亦即將全濃度處方稀釋2倍或4倍。由許多的培養液發表者的培養液處方，整理出其組成之全離子濃度，以0.4~1.0 atm之範圍最多，培養液濃度範圍以25~40mM為適合(Hewitt 1966)。

三、各離子濃度

培養液中之各離子之濃度常以重量比(如百萬分率濃度，單位ppm)，單位容積中之毫莫耳數(單位為mM)，單位容積中之毫克當量數(單位為me/L)來表示。重量比是以培養液的處方為計算，對於

肥料鹽的秤重較為方便。但是作物吸收同樣個數的不同養分離子時，其重量並不相同，因此養分吸收以離子個數(如毫莫耳數、毫克當量數)來考量較為合理，並非以元素或以離子的重量。因此，培養液組成以離子數為基準，以莫耳數或克當量數表示較容易。另外，為了考慮肥料鹽中養分離子間的比率(如1個K_2SO_4中含有2個K^+和1個SO_4^{2-})，而以克當量數來表示是必要的。實際上，一般大量元素以me/L為單位，微量元素則以ppm為單位來表示之。

Hewitt(1966)將很多培養液之大量元素濃度廣範整理如（表三），各主要元素濃度範圍分別為：NO_3^-N：5~18，NH_4^+-N：0~3，PO_4^{3-}：2~4，K^+：2~8，Ca^{2+}：6~10，Mg^{2+}：1~4，SO_4^{2-}：1~4me/L。另依Jones(1983)整理示出使用的之9種組成濃度範圍，如（表四）供參考。

四、培養液配製時各種表示法與單位間轉換

(一)莫耳(mol)及毫莫耳(m mol)

分子量是以克為單位者，稱莫耳。例如氧一莫耳等於32克。化合物的克重量與其分子量相等，美國寫法mole，英國寫法mol。毫莫耳(以m mol表示)則為莫耳的千分之一。

(二)原子量(atomic weight)

為1莫耳原子的重量(以公克計算，但原子量本身沒有單位)。例如N之原子量為14，表示1莫耳N重14公克(以g表示)；P之原子量為31，表示1莫耳P重31g。實際應用的時候，我們也常用毫克(以mg表示)及毫莫耳來計算，同前例中N之原子量為14，也表示1毫莫耳N重14mg；P之原子量為31，也表示1毫莫耳P重31mg。

(三)分子量(molecular weight)

為1莫耳分子的重量(以公克計算，但分子量本身沒有單位)，也就是化合物分子中全部元素的原子量乘以原子個數後的總和。例如KC1之分子量＝39.1×1+35.5×1＝74.6，H_3BO_3之分子量＝1×3+10.8×1+16×3＝61.8。

(四)當量(equivalent weight ; eq)

將元素的原子量除以該元素被作物吸收時的離子型態的價數即為其當量。如N常以NH_4^+或NO_3^-型態被吸收，兩者的價數皆為1價，故N的當量通常為14÷1＝14；又Ca以Ca^{2+}型態被吸收，其價數為2，故Ca的當量為40÷2＝20。另外，有關P、S之價數，則取PO_4^{3-}、SO_4^{2-}等被作物吸收之形態的價數，P為3價、S為2價。而以其原子量被除之即可得當量，如（表一），P、S之當量分別為10.3、16。

(五)當量濃度(equivalent concentration)及毫當量濃度

1公升(以L表示)養液中所含元素克當量數即稱為當量濃度(單位為eq/L或N)，N＝溶質克當量/溶液1L，例如1L水溶液中含36.46g之HCl則其當量濃度為1N)。克當量數的計算方式為將元素重量(以公克計)除以當量。但一般養液濃度以毫當量濃度表示較當量濃度者為多。

1公升養液中所含元素毫克當量數即稱為毫當量濃度(單位為meq/L或me/L)。毫克當量數的計算方式為將元素重量(以毫克計)除以當量。例如今有78mg K要溶成養液，由於K之原子量為39、價數為1，所以其當量為39÷1＝39，毫克當量數為78÷39＝2(亦即2me)，換言之1me K等於39mg；又如有80mg Ca要溶成養液，Ca之原子量為40，價數為2，所以其當量為40÷2＝20，毫克當量數為80÷20

＝4(亦即4me)，換言之1me鈣等於20mg。當我們將上述K、Ca溶於1公升水，則該溶液中K、Ca之濃度分別為2me/L、4me/L；若將其溶於2公升水，則該溶液中K、Ca之濃度分別為1me/L、2me/L。

(六)每百萬的部分濃度(parts per million)

每百萬的部分濃度(單位為ppm，亦可表為mg/L、mg/Kg)即溶液中含有溶質多少百萬分之一的意思。例如1公升水為1,000公克重，也就是1,000,000毫克，今將1毫克K溶解其中，所得溶液中K的重量為水的百

表一、高等植物之必需元素

類 別	元 素	原子量	有效形態	當量重 mg/me
重要元素	碳C	12.01	CO_2	1mM 44mg
	氫H	1.01	H_2O	1mM 18
	氧O	16.00	O_2	1mM 32
大量元素	氮N	14.01	NO_3^-, NH_4^+	14.0
	磷P	30.98	$H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-}	10.3
	鉀K	39.10	K^+	39.1
	鈣Ca	40.08	Ca^{2+}	20.0
	鎂Mg	24.32	Mg^{2+}	12.1
	硫S	32.07	SO_4^{2-}	16.0
微量元素	鐵Fe	55.85	Fe^{3+},Fe^{2+}	27.9
	錳Mn	54.94	Mn^{2+}	27.5
	硼B	10.82	BO_3^{3-}, $B_4O_7^{2-}$	3.6
	銅Cu	63.54	Cu^{2+}, Cu^+	31.8
	鋅Zn	65.38	Zn^{2+}	32.7
	鉬Mo	95.95	MoO_4^{2-}	48.0
	氯Cl	35.46	Cl^-	35.4
特殊元素	矽Si	28.09	SiO_4^{4-}	7.0
	鋁Al	26.98	Al^{3+}	9.0
	鈉Na	22.99	Na^+	23.0

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℃ g/l）	純度%	大約價格 元/公斤
硝酸鉀	KNO_3	101	K^+,NO_{3-}	315	95	50～60
硝酸鈣	結晶Ca（NO_3）$_2$・$4H_2O$	236	Ca_2^+,2（NO_{3-}）	1270	70	20～27
磷酸一銨	$NH_4H_2PO_4$	115	NH_4^+,H2PO_4-	365	98	50～64
硫酸鎂	$MgSO_4$・$7H_2O$	246	Mg^{2+},SO_4^{2-}	356	45	44
硝酸銨	NH_4NO_3	80	NH_4^+,NO3-	655	98	
硫銨	（NH_4）$_2SO_4$	132	2（NH_4^+）,SO_4^{2-}	754	94	5.6
氯化銨	NH_4Cl	53.5	NH_4^+,Cl^-	1630		
尿素	（NH_2）$_2CO$	60	NH_4^+	1000	98	9.8
硫酸鉀	K_2SO_4	174	$2K^+$,SO_4^{2-}	111	90	31
氯化鉀	KCl	74.5	K^+,Cl^-	265	95	8.4
氯化鈣	$CaCl_2$・$2H_2O$	147	Ca^{2+},Cl^-	536	75	24
磷酸一鉀	KH_2PO_4	136	K^+,H2PO_4^-	227	98	70
EDTA 鐵	Fe-EDTA	368	Fe^{2+}	421	12.5	250
硼酸	H_3BO_3	62	$B3^+$	46	18	55～60
硫酸錳	$MnSO_4$・$4H_2O$	223	Mn^{2+},SO_4^{2+}	500	99	

萬分之一，該溶液中K即為1ppm。換言之1,000公升水中溶解1公克或1公升水中溶解1毫克都是1ppm。另由前段可知，K 1me/L即等於39mg溶於1公升水中，也就等於39ppm，Ca 1me/L等於20mg溶於1公升水中，也就等於20ppm。SO42- 3me/L其中S等於16×3＝48ppm。

相反的，K 300ppm的話就是1公升中有300mg K，可換算為300÷39＝7.7me/L。以養液栽培的肥料鹽來舉例，硝酸鈣[$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$]分子量為40＋(14＋16×3)×2＋4×(1×2＋16)＝236，其1分子中含有1個2價的Ca^{2+}，及2個1價的NO_3^-。今將硝酸鈣236mg（即1m mol)溶解於1公升水中的話，其中包括Ca 40mg(40×1)及N 28mg(14×2)，所以Ca等於40÷20＝2me/L，N等於28÷14＝2me/L。若以ppm計算時則Ca為40ppm，NO_3-N(即硝態氮)為28ppm。除此之外，還要留意肥料的純度，一般養液栽培的肥料為工業級或食品級，如果是純度略低，其濃度為90％，則換算成純度100％，就要秤236×100/90＝262.2mg硝酸鈣才能達到上述的成分量。

另以磷酸一銨為例，$NH_4H_2PO_4$分子量為115，其純度為98％，則115×100/98＝117.35mg溶解於1公升水中時，PO_4^{3-}為3me/L和NH_4^+為1me/L。換算為百萬分率濃度時，則PO_4^{3-}-P＝10.3×3＝30.9ppm，NH_4^+-N＝14×1＝14ppm。再以硼酸(H_3BO_3)為例，其分子量為62，要得到1ppm B，則必需將1mg B溶解於1公升水中，換算成硼酸則為(62÷11)mg溶解於1公升水中，若培養液中需要0.3ppm的話，0.3ppm B＝62÷11×0.3＝1.7mg硼酸溶解於1公升水中，或是1.7g溶於1公噸水中。

表三、培養液成分之適宜濃度範圍

大量元素	適宜範圍 me/L	微量元素	適宜濃度 ppm
NO_3-N	5－14－18	Fe	5.600
NH_4-N	0－1－3	Mn	0.550
PO_4-P	2－3－4	Cu	0.064
K	2－6－8	Zn	0.065
Ca	6－8－10	B	0.330
Mg	1－2－4	Mo	0.048
SO_4	1－2－4	Cl	3.500

資料來源：（Hewitt 1965）

(七)莫耳濃度或毫莫耳濃度

1公升養液中所含元素或分子之莫耳數即稱為莫耳濃度(單位為mol/L或M)。莫耳數的計算方式為將元素或分子重量(以公克計)除以原子量或分子量。但一般養液濃度以毫莫耳濃度表示較莫耳濃度者為多。

1公升養液中所含元素或分子之毫莫耳數即稱為毫莫耳濃度(單位為m mol/L或mM)。毫莫耳數的計算方式為將元素或分子重量(以毫克計)除以原子量或分子量。例如硝酸鈣[$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$]，1毫莫耳為236毫克，將硝酸鈣236mg溶解於水中成1公升時，NO_3^-和Ca^{2+}濃度分別為2m mol/L、1m mol/L。將其換算成me/L的話，Ca^{2+}和NO_3^-各為2me/L。硝酸鉀[KNO_3]分子量為101，將硝酸鉀101毫克溶解於水成1公升時，NO_3^-和K^+各為1m mol/L，以me表示的話，各為1me/L。

(八)肥料保證成分

肥料之保證成分，除了氮素是直接以N的百分比來表示外，其於磷、鉀、鈣、鎂都是以氧化物的百分比來表示，如磷酐(P_2O_5)％、氧化鉀(K_2O)％、氧化鈣(CaO)、氧化鎂(MgO)％等，可換算成表元素的％。例如某肥料P_2O_5保證成分是8％時，可換算為元素磷之換算係數為

P2÷P_2O_5=(31×2)÷(31×2+16×5)=0.437，所以該肥料中元素P=8%×0.437=3.5%。以肥料1,500g加入養液桶1,000公升中，即得磷酐(P_2O_5)濃度為1,500g×0.08÷1,000L=120g/1,000L=0.12g/L=120mg/L=120ppm，若換算成P濃度則乘上0.437得52.4ppm。有關其他成分濃度間換算係數詳如（表五）。

其次，如（表一）和（表二）成分組成以毫當量濃度(me/L)表示時，肥料鹽之量可以上述方法換算得到其值。以日本園藝試驗場標準處方來看：NO_3^--N、P、K、Ca、Mg分別為16、4、8、8、4me/L，K使用KNO_3、Ca以$Ca(NO_3)_2\cdot 4H_2O$、Mg以$MgSO_4\cdot 7H_2O$、磷酸以$NH_4H_2PO_4$等肥料鹽配製時，肥料鹽(純品)之KNO_3、$Ca(NO_3)_2\cdot 4H_2O$、$MgSO_4\cdot 7H_2O$、$NH_4H_2PO_4$之當量分別為101、118、123、38。通常培養液NO_3^--N是以KNO_3和$Ca(NO_3)_2\cdot 4H_2O$共同配製，16me/L中KNO_3供8me/L，$Ca(NO_3)_2\cdot 4H_2O$供8me/L，算出1公升溶解之肥料鹽量KNO_3是8me/L×101mg/me=808mg/L=808ppm，$Ca(NO_3)_2\cdot 4H_2O$是8me/L×118mg/me=944mg/L=944ppm，$MgSO_4\cdot 7H_2O$是8me/L×123mg/me=984mg/L=984ppm，$NH_4H_2PO_4$是4me/L×38mg/me=152mg/L=152ppm。其他之處方也可用此方式計算出肥料鹽之重量。

另一種方法，係以各成分元素之毫當量濃度換算出所需之肥料鹽量。例如養液1公升中必須K之量是8me時，亦即需要K量為8me×39.1mg=312.8mg。此312.8mg之K，若以KNO3來配製，因KNO3中K之含有率是38.7%，(39.1÷101.1=0.387)，因此需要312.8÷0.387=808mg之KNO3。（待續）

表四、培養液中之大量要素之濃度（ppm）

元素種類		不足	適宜	過剩	普遍濃度範圍
N	以NO_3^-使用	0.14－10	3.0－70	20－200	40－210
	以NH_4^+使用	0.007－5	0.03－25	0.4－100	0－154
K	NH_4^+含有者	0.4－6	10－39	－	59－390
	NH_4^+不含者	0.04－4	1.1－5		
Ca		0.02－22	0.24－40	－	80－200
Mg		0.05－6	0.2－9	－	24－60
P		0.003－4	0.07－2.6	0.03－4	15－192
S		－	1.3	－	48－224

資料來源：（Jones 1983）

表五、肥料成分之單位間轉換係數

單位間轉換		N	P	K	Ca	Mg	S
		NO_3-N	P_2O_5	K_2O	CaO	MgO	SO_4-S
①	元素（mg）→氧化物（mg）	×2.295	×1.205	×1.399	×1.658	×3.000	
②	氧化物（mg）→元素（mg）		×0.437	×0.830	×0.715	×0.603	×0.333
③	元素（ppm）→元素（me/L）	÷14.0	÷10.3	÷39.1	÷20.0	÷12.2	÷16.0
④	元素（ppm）→元素（mM/L）	÷14.0	÷31.0	÷39.1	÷40.1	÷24.3	÷32.1
⑤	元素或氧化物（ppm）→元素（me/L）	×0.0714	×0.0423	×0.0212	×0.0357	×0.0498	×0.0208