

在营养液循环栽培系统中,根系呼吸作用所需的氧气主要是来自营养液中溶解的氧。加氧措施主要是利用机械和物理的办法来增加营养液与空气接触的机会,增加氧在营养液中的扩散能力(图2),从而提高营养液中氧气的含量,常用的办法有4种(图3)。

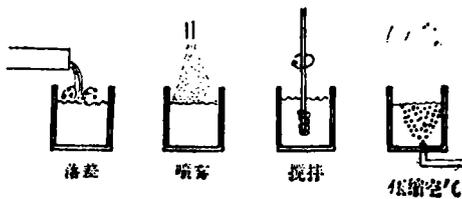


图3 营养液上加氧的方法

在固体基质的无土栽培中,为了保持基质中有充足的空气,除了应选用合适的基质种类以外,还应避免基质积水。通常应保持基质湿度在6~40kPa范围内,以利根系的正常生长。

参考文献

- 1 郑光华,汪浩,李文田.蔬菜花卉无土栽培技术.上海,上海科技出版社,1990
- 2 A.Cooper,Nutrient film Technique,London,1982
- 3 FAO Plant Production and Protection Paper. Soilless Culture for Horticultural Crop Production,Rome,1990

营养液配方的计算方法

蒋卫杰

(中国农科院蔬菜花卉研究所 北京100081)

无土栽培作物所需养分的供应,不是靠施肥,而是使用营养液,即根据不同作物对养分的要求特点,利用无机盐类肥料,人工配制成含有所有必需元素的营养液进行栽培。因此,营养液的配制与施用,是无土栽培的关键技术,它不仅直接影响到作物的生长发育及产量,而且关系到能否经济用肥、降低成本、提高经济效益。

一、营养液浓度的表示方法

营养液浓度是指一定量(一定重量或一定体积)的营养液中所含元素(或肥料)的

量。其表示方法通常有如下几种:

(一) 10^{-6} (百万分之一) 浓度表示法过去常用ppm表示,在营养液中每种必需元素的百万分之几,称为若干ppm。它可以用重量表示,也可以用重量体积表示:

$$10^{-6} = 1\text{ppm} = 1\mu\text{g}/\text{g} = 1\mu\text{L}/\text{L} \\ = 1\text{mg}/\text{L} = 1\text{g}/1000\text{L} = 1\text{g}/\text{t}$$

(二) 毫摩尔 (mmol) 浓度表示法 1L营养液中含有元素的摩尔数,称作摩尔浓度,以摩尔 (M) 或毫摩尔 (mM) 表示。

$$1\text{摩尔 (M)} = 1000\text{毫摩尔 (mM)}$$

摩尔是表示物质的量的单位，一定物质中所含摩尔的数目，叫做摩尔数。1摩尔某物质的质量叫摩尔质量，在数值上等于该物质的分子量或原子量，以g/mol表示。

因为营养液的浓度比较低，所以采用毫摩尔浓度（mM）来表示。如1L溶液中164g的Ca(NO₃)₂为1M，164mg为1mM，或者1L溶液中40gCa为1M，40mgCa为1mM。

（三）毫克当量（me）浓度表示法
1L营养液中含有元素或肥料的克当量数，称克当量浓度。以克表示称克当量（N），以毫克表示称毫克当量（mN），在无土栽培中常表示为me。

如Ca(NO₃)₂每升164g为1摩尔（M），则每升82g为1当量（N），82mg为1毫克当量（mN），对于Ca来说，20mg为1mN，无土栽培中常采用1me来表示。

$$1N = 1000mN = 1000me$$

二、浓度计算的基本公式

$$1. W = \frac{CM}{A} \cdot \frac{100}{P}$$

式中：W = 每升水所需某化合物的毫克数

C = 营养液中某元素的百万分之浓度值

M = 所用化合物的分子量

A = 某元素的原子量

P = 化合物的百分纯度

$$2. N = \frac{E}{V}$$

式中：N = 克当量浓度

E = 某肥料或元素的克当量数

V = 营养液的体积（L）

$$3. M = \frac{n}{V}$$

式中：M = 营养液的摩尔浓度

n = 某肥料或元素的摩尔数

V = 营养液的体积（L）

$$n = \frac{R}{m} \text{ 式中：} R = \text{某元素或肥料的质量（g）,}$$

m = 某肥料或元素的摩尔质量（g/mol）

三、常见浓度间的换算

$$1. \text{营养液某肥料或元素的百万分之浓度（mg/L）} = \text{毫克当量} \times \text{当量} = \text{毫摩尔数} \times \text{摩尔质量}$$

$$2. \text{营养液的当量浓度N（克当量/克）} = \text{营养液的摩尔浓度M（摩尔/升）} \times \text{化合价}$$

四、营养液配方所用肥料数量的计算方法及计算实例

任何一种配方的计算，都离不开元素和化合物，而元素和化合物的原子量和分子量，在计算养分配方的浓度时是必不可少的，原子量为各原子的相对重量，现将无土栽培常用的原子量列于表1。

表1 无土栽培常用元素的原子量

名称	符号	原子量
铝	Al	26.98
硼	B	10.81
钙	Ca	40.08
碳	C	12.01
氯	Cl	35.45
铜	Cu	63.55
氢	H	1.008
铁	Fe	55.85
镁	Mg	24.31
锰	Mn	54.94
钼	Mo	95.94
氮	N	14.01
氧	O	16.00
磷	P	30.97
钾	K	39.10
硒	Se	78.96
硅	Si	28.09
钠	Na	22.99
硫	S	32.06
锌	Zn	65.38

原子进行化合时，它就形成分子，以分子式表示之，分子式中各原子的原子量之和就是该分子式的分子量。现在根据荷兰温室园艺研究所1989年推荐的番茄营养液配方，以此为例来说明计算方法。

番茄营养液配方 (荷兰, 1989)

	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺	P-H ₂ PO ₄ ⁻	S-SO ₄ ²⁺ K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	
1 × 10 ⁻⁶	189	7	46.5	120	362	185.4	42.5
mmol/L	13.5	0.5	1.5	3.75	9.25	4.625	1.75
me	13.5	0.5	4.5	7.5	9.25	9.25	3.5
	Fe	Mn	Zn	B	Cu	Mo	
1 × 10 ⁻⁶	0.84	0.55	0.33	0.27	0.05	0.05	
μmol/L	15	10	5	25	0.75	0.5	
me	45	20	10	75	1.5	3.0	

(一) 根据元素的百万分之浓度数比例计算法 一般而言, 在进行营养液配方的计算时, 因为钙的需要量大, 并且大多数情况下仅以硝酸钙作为唯一钙源, 所以计算时先从钙的量开始, 钙的量满足后, 再计算其他元素的量。一般是计算氮, 然后计算磷和钾, 最后计算镁, 因为镁与其他元素不互相影响。

微量元素的需要量少, 在培养液中浓度又非常低, 因而不用像大量元素那样, 重视总离子浓度, 所以每个元素均可单独计算, 而无须考虑其对其他元素的影响。

配方中要求185.4 × 10⁻⁶的钙, 即每升水中需要含钙185.4mg, 由于目前国内市场上出售的硝酸钙均是含4个结晶水的硝酸钙, 故本文有关硝酸钙用量的计算均是指含有4个结晶水的硝酸钙[Ca(NO₃)₂ · 4H₂O]。Ca(NO₃)₂ · 4H₂O的分子量为236, 如果把结晶水视为杂质, 则Ca(NO₃)₂的纯度为62.5%, Ca(NO₃)₂的分子量是164, 即在236mgCa(NO₃)₂ · 4H₂O或164mgCa(NO₃)₂中有40mg钙。

根据公式 $W = \frac{CM}{A} \cdot \frac{100}{P}$, 可以求出185.4mg钙时需要的硝酸钙的重量。已知C = 185.4, M = 164, A = 40, P = 62.5则:

$$W = \frac{185.4 \times 164}{40} \times \frac{100}{62.5} = 1216\text{mg}$$

即用1216mgCa(NO₃)₂ · 4H₂O溶于1L水中, 可以得到185.4 × 10⁻⁶钙的浓度。

因为硝酸钙即含有Ca又含有N, 当钙满足需要时, 要算出加入氮的百万分之浓度数,

以便求出需要补入氮的百万分之浓度数。当Ca = 185.4 × 10⁻⁶时, Ca(NO₃)₂ · 4H₂O同时提供的N的百万分之浓度, 可由 $C_2 = \frac{A_2}{A_1} C_1$ 公式计算。

式中:

A₁为化合物中第一种元素的总原子量

A₂为第二种元素的总原子量

C₁为化合物中第一种元素在营养液中的百万分之浓度数

C₂为第二种元素在营养液中的百万分之浓度数

已知A₁ = 40, A₂ = 14 × 2 = 28, C₁ = 185.4

所以 $C_2 = \frac{28}{40} \times 185.4 \times 10^{-6} = 130 \times 10^{-6}$ (硝酸钙提供的N浓度)。

营养液中的铵态氮(N-NH₄⁺)一般由NH₄NO₃提供, 由公式 $W = \frac{CM}{A} \cdot \frac{100}{P}$ 可计算出N-NH₄⁺ = 7 × 10⁻⁶时, 所需的NH₄NO₃的量。已知C = 7, M = 80, A = 14, P = 95, 则 $W = \frac{7 \times 80}{14} \times \frac{100}{95} = 42.1\text{mg NH}_4\text{NO}_3$

由公式 $C_2 = \frac{A_2}{A_1} C_1$ 可计算出, 当N-NH₄⁺ = 7 × 10⁻⁶时, NH₄NO₃可同时提供的N-NO₃⁻的百万分之浓度数, 已知A₁ = A₂ = 14, C₁ = 7, 所以C₂ = 7 × 10⁻⁶ (NH₄NO₃提供的N-NO₃⁻的浓度)。

氮(N-NO₃⁻)的总需要量为189 × 10⁻⁶, 现在已有130 × 10⁻⁶ [Ca(NO₃)₂ · 4H₂O

提供的 $N-NO_3^-$ $] + 7 \times 10^{-6}$ (NH_4NO_3 提供的 $N-NO_3^-$) = 137×10^{-6} , 所以所需补充的氮为 $189 - 137 = 52 \times 10^{-6}$ 。

所差的 52×10^{-6} 氮可用硝酸钾来补充。

根据公式 $W = \frac{CM}{A} \cdot \frac{100}{P}$, 可计算出提

供 52×10^{-6} N 时所需的 KNO_3 的用量。已知 $C = 52 \times 10^{-6}$, $M = 101$, $A = 14$, $P = 95$, 代入式中得:

$$W = \frac{52 \times 101}{14} \times \frac{100}{95} = 395 \text{ mg } KNO_3$$

即满足 52×10^{-6} 的氮需要的硝酸钾应为 395 mg/L , 与此同时可算出 $395 \text{ mg } KNO_3$ 所供应的钾, 代入式中:

$$C_2 = \frac{A_2}{A_1} C_1 = \frac{39}{14} \times 52 = 145 \text{ mg/L}$$

配方中需要的钾为 362×10^{-6} , 现在已有 145 mg/L , 尚需 $362 - 145 = 217 \times 10^{-6}$ 的钾,

如果仅用磷酸二氢钾来补充 217×10^{-6} 的钾时, 不难看出当钾满足了, 但磷的量会超过需要。因此, 现在首先计算出提供 46.5×10^{-6} 的磷所需的 KH_2PO_4 的量。

$$W = \frac{CM}{A} \cdot \frac{100}{P} = \frac{46.5 \times 136}{31} \times \frac{100}{98} = 208 \text{ mg}$$

由 $208 \text{ mg } KH_2PO_4$ 所供应的钾量, 代入公式:

$$C_2 = \frac{A_2}{A_1} \times C_1 = \frac{39}{31} \times 46.5 \times 10^{-6} = 58.5 \times 10^{-6}$$

前面已算出需要钾 217×10^{-6} , 现在 $208 \text{ mg } KH_2PO_4$ 已有钾 58.5 mg , 则 $217 - 58.5 = 158.5$, 即尚需 158.5 mg 的钾。所需补充的 158.5×10^{-6} 的钾由硫酸钾提供, 根据公式:

$$W = \frac{CM}{A} \cdot \frac{100}{P}$$

$$W = \frac{158.5 \times 174}{2 \times 39} \times \frac{100}{90} = 393 \text{ mg } K_2SO_4$$

营养液中镁的供应通常都由硫酸镁提供, 按配方要求中 $42.5 \times 10^{-6} \text{ Mg}$ 所需的 $MgSO_4$ 的用量为:

$$W = \frac{CM}{A} \cdot \frac{100}{P} = \frac{42.5 \times 120}{24.3} \cdot \frac{100}{45} = 466 \text{ mg}$$

由 K_2SO_4 和 $MgSO_4$ 所提供的硫的量 总共为 120×10^{-6} , 符合配方要求。但由于植物对硫多少的反应不十分敏感, 因此硫的用量一般可以不计算。

根据以上计算结果, 可以得出番茄配方每升水中应加入肥料的量为:

硝酸钙 [$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$]	1216mg
硝酸钾 (KNO_3)	395mg
硝酸铵 (NH_4NO_3)	42.1mg
磷酸二氢钾 (KH_2PO_4)	208mg
硫酸钾 (K_2SO_4)	393mg
硫酸镁 ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$)	466mg

微量元素的计算比较简单, 由于微量元素的需要量较少, 因此各个微量元素均可单独计算, 用公式 $W = \frac{CM}{A} \cdot \frac{100}{P}$ 即可算出其化合物的用量

$$W_{\text{螯合铁}} = \frac{0.84 \times 421}{56} \cdot \frac{100}{98} = 6.44 \text{ (mg/L)}$$

$$W_{\text{硫酸锰}} = \frac{0.55 \times 169}{55} \cdot \frac{100}{98} = 1.72 \text{ (mg/L)}$$

$$W_{\text{硫酸锌}} = \frac{0.33 \times 288}{65.4} \cdot \frac{100}{99} = 1.46 \text{ (mg/L)}$$

$$W_{\text{四硼酸钠}} = \frac{0.27 \times 381}{10.8 \times 4} \cdot \frac{100}{100} = 2.38 \text{ (mg/L)}$$

$$W_{\text{硫酸铜}} = \frac{0.05 \times 250}{64} \cdot \frac{100}{99} = 0.20 \text{ (mg/L)}$$

$$W_{\text{钼酸钠}} = \frac{0.05 \times 242}{96} \cdot \frac{100}{99} = 0.13 \text{ (mg/L)}$$

由上可得, 配制 1L 番茄营养液, 需加入:

螯合铁 ($EDTA-FeNa \cdot 3H_2O$)	6.44mg
硫酸锰 ($MnSO_4$)	1.72mg
硫酸锌 ($ZnSO_4$)	1.46mg
四硼酸钠 ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$)	2.38mg
硫酸铜 ($CuSO_4$)	0.20mg
钼酸钠 ($Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$)	0.13mg

(二) 第二种配方计算法 可先算出每百万分之浓度元素所需肥料用量, 然后乘上配方中各元素的需要量。由于 1×10^{-6} , 必需元素所需肥料量均有现成的可以利用(表

2),所以在进行实际配方计算时,只要把表2中 1×10^{-6} 必需元素所需肥料量乘以营养液配方中所需该元素的百万分之浓度数,即可计算出相应肥料的用量(g/1000L或mg/L)。

第一步计算用 185.4×10^{-6} Ca所需的 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 的量,由表2可知 1×10^{-6} Ca需6.56g $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$,则 $185.4 \times 6.56 = 1216\text{mg}\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 。由于 1×10^{-6} Ca的 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 中含有 0.7×10^{-6} 的氮,则 $185.4 \times 10^{-6} \times 0.7 = 130 \times 10^{-6}$ 的氮。

第二步计算 7×10^{-6} 铵态氮(N-NH₄⁺)所需的NH₄NO₃的量:

$7 \times 6.02 (1 \times 10^{-6}\text{N-NH}_4^+ \text{ 所需的 } \text{NH}_4\text{NO}_3) = 42.1\text{mg}$ 。由于 $1 \times 10^{-6}\text{N-NH}_4^+$ 的NH₄NO₃中含有 $1 \times 10^{-6}\text{N-NO}_3^-$,则:

$7 \times 1 = 7 \times 10^{-6}$ 的氮由第一步和第二步可得,现已有 $130 \times 10^{-6} + 7 \times 10^{-6} = 137 \times 10^{-6}$ 的氮。

根据配方要求,氮(N-NO₃⁻)的需要量总共为 189×10^{-6} ,所以所需补充的氮为 $189 \times 10^{-6} - 137 \times 10^{-6} = 52 \times 10^{-6}$ 。

第三步计算 52×10^{-6} 氮所需的KNO₃的量:

$52 \times 7.6 (1 \times 10^{-6}\text{氮所需的 } \text{KNO}_3 \text{ 的})$

表2 1×10^{-6} 元素所需肥料用量

元素	化肥	分子式	分子量	纯度	理论需量	实际需要量	其他元素的百万分之浓度
P	磷酸二氢铵	NH ₄ H ₂ PO ₄	115	98	3.71	3.79	0.45N
N	磷酸二氢铵	NH ₄ H ₂ PO ₄	115	98	8.21	8.38	2.2P
N	硫酸铵	(NH ₄) ₂ SO ₄	132	94	4.72	5.02	1.1S
N(NH ₄ ⁺)	硝酸铵	NH ₄ NO ₃	80	95	5.72	6.02	1N-NO ₃ ⁻
N(NO ₃ ⁻)	硝酸铵	NH ₄ NO ₃	80	95	5.72	6.02	1N-NH ₄ ⁺
N	硝酸钾	KNO ₃	101	95	7.22	7.60	2.79K
K	硝酸钾	KNO ₃	101	95	2.59	2.72	6.86N
N	硝酸钙	Ca(NO ₃) ₂	164	90	5.86	6.57	1.48Ca
Ca	硝酸钙	Ca(NO ₃) ₂ · 4H ₂ O	236	82.5 [*]	4.10	6.56	0.70N
P	磷酸二氢钙	Ca(H ₂ PO ₄) ₂	234	92	3.78	4.11	0.65Ca
Ca	磷酸二氢钙	Ca(H ₂ PO ₄) ₂	234	92	5.84	6.35	1.55P
K	硫酸钾	K ₂ SO ₄	174	90	2.28	2.48	0.41S
K	氯化钾	KCl	74	95	1.91	2.01	0.91Cl
Mg	硫酸镁	MgSO ₄	120	45	4.95	10.97	1.32S
Ca	氯化钙	CaCl ₂	111	75	2.77	3.69	1.77Cl
P	磷酸二氢钾	KH ₂ PO ₄	136	98	4.39	4.48	1.26K
K	磷酸二氢钾	KH ₂ PO ₄	136	98	3.48	3.55	0.79P
Fe	EDTA-FeNa · 3H ₂ O		421			7.58	
Fe	硫酸亚铁	FeSO ₄ · 7H ₂ O	273			13.90	
Mn	硫酸锰	MnSO ₄ · H ₂ O	169			3.14	
B	硼砂	Na ₂ B ₄ O ₇ · 10H ₂ O	381			8.81	
B	硼酸	H ₃ BO ₃	62			3.55	
Zn	硫酸锌	ZnSO ₄ · 7H ₂ O	288			4.45	
Cu	硫酸铜	CuSO ₄ · 5H ₂ O	250			3.95	
Mo	过钼酸铵	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ · 4H ₂ O	1236			22.74	
Mo	钼酸钠	Na ₂ MoO ₄ · 2H ₂ O	242			2.54	

* 系Ca(NO₃)₂的纯度。

量) = 395mgKNO₃。

第四步计算: 46.5 × 10⁻⁶ 磷所需的 KH₂PO₄ 的量: 由表2查出 1 × 10⁻⁶ 的 P 需 4.48mg/L 的 KH₂PO₄, 则 46.5 × 4.48 = 208mg/L 的 KH₂PO₄。

第三步所施 KNO₃ (52 × 10⁻⁶ 的 N) 中, 钾的百万分浓度数为 52 × 2.79 = 145 (× 10⁻⁶), 第四步所用 KH₂PO₄ (46.5 × 10⁻⁶ 的 P) 中含钾为: 46.5 × 1.26 = 58.5 (× 10⁻⁶), 则已供的钾为 145 + 58.5 = 203.5 (× 10⁻⁶), 根据配方要求, 总的需钾量为 362 × 10⁻⁶, 则尚需补充 362 - 203.5 = 158.5 (× 10⁻⁶)。

第五步计算 158.5 × 10⁻⁶ 的 K 所需的 K₂SO₄ 的量为: 158.5 × 2.48 = 393mg/L。

第六步计算所需镁的量:

按配方中需镁量为 42.5 × 10⁻⁶, 表 2 中每 1 × 10⁻⁶ Mg 需 MgSO₄ 10.97mg/L, 则 42.5 × 10.97 = 466mg/L。

第七步计算微量元素的配方(略)。

则所计算出的配方为:

硝酸钙 [Ca(NO ₃) ₂ · 4H ₂ O]	1216mg/L
硝酸钾 (KNO ₃)	395mg/L
磷酸二氢钾 (KH ₂ PO ₄)	208mg/L
硝酸铵 (NH ₄ NO ₃)	42.1mg/L
硫酸钾 (K ₂ SO ₄)	393mg/L
硫酸镁 (MgSO ₄ · 7H ₂ O)	466mg/L

(三) 毫摩尔计算法 仍以荷兰番茄配方为例, 用化合物摩尔平衡法, 得出表3。

表3 番茄营养液配方的化合物组配平衡

化合物	mmol/L	N(NO ₃ ⁻)	N(NH ₄ ⁺)	P	S	K	Ca	Mg
		13.5	0.5	1.5	3.75	9.25	4.625	1.75
Ca(NO ₃) ₂	4.625	9.25					4.625	
KNO ₃	3.75	3.75				3.75		
NH ₄ NO ₃	0.5	0.5	0.5					
KH ₂ PO ₄	1.5			1.5		1.5		
K ₂ SO ₄	2				2	4.0		
MgSO ₄	1.75				1.75			1.75

用毫摩尔数乘分子量, 即得所需化合物的用量, 但由于化合物中含有杂质, 故应先除以百分纯度, 然后乘摩尔数, 现计算如下:

1. Ca(NO₃)₂ · 4H₂O 用量的计算:

Ca(NO₃)₂ · 4H₂O 的分子量为 236, 其中 Ca(NO₃)₂ 的纯度为 62.5%, 分子量为 164, 则

$$164 \div 0.625 \times 4.625 = 1214 \text{ mg/L}$$

2. KNO₃ 用量的计算:

$$101 \div 0.95 \times 3.75 = 398 \text{ mg/L}$$

3. NH₄NO₃ 用量的计算:

$$80 \div 0.95 \times 0.5 = 42.1 \text{ mg/L}$$

4. KH₂PO₄ 用量的计算:

$$136 \div 0.98 \times 1.5 = 208 \text{ mg/L}$$

5. K₂SO₄ 用量的计算:

$$174 \div 0.9 \times 2 = 387 \text{ mg/L}$$

6. MgSO₄ · 7H₂O 用量的计算:

$$120 \div 0.45 \times 1.75 = 467 \text{ mg/L}$$

参考文献

- 1 郑光华, 汪浩, 李文田. 蔬菜花卉无土栽培技术. 上海, 上海科学技术出版社, 1990
- 2 汪兴汉. 无土栽培营养液的组配与计算方法. 江苏农业科学, 1989(10): 32~34
- 3 汪兴汉. 无土栽培营养液配方及其配制与使用. 江苏农业科学, 1989(11): 34~36