

设施栽培中营养液成分的在线检测

邱雪峰 薛美盛 孙德敏 张建龙

(中国科学技术大学自动化系)

摘要: 设施栽培中为了加强营养液的管理并循环使用营养液, 需在线检测营养液的 EC 值、pH 值和各种养分的含量, 及时调配营养液以达到养分均衡。本文利用离子选择性电极实现了对氮、钾、钙等离子浓度以及 EC 值和 pH 值的在线检测, 并根据各营养元素浓度在特定作物特定生长期及生长环境相对稳定的一段时期内与 EC 值、pH 值之间相对稳定的关系, 以及各营养元素之间变化关系实现了磷、硫和镁离子浓度的软测量。

关键词: 设施栽培; 营养液; 软测量

设施栽培^[1]是借助一定的硬件设施通过对作物生长的全过程或部分阶段所需环境条件进行调节, 以使其尽可能满足作物生长需要的技术密集型农业生产。设施栽培中, 作物生长所需营养成分全部从营养液中吸收, 其管理水平高低直接关系到作物生长状况、产量和产品品质。目前, 国内外主要根据营养液的导电率 (EC 值) 和 pH 值进行营养液的管理^[2~4]。EC 值通常用来表示营养液的浓度, 但它只能反映出营养液中总的离子浓度, 不能反映各组分的相对活度, 即无法反映出受众多因素影响的营养液组分的变化。若营养液营养均衡, 即作物吸收各元素的比例与营养液中各元素的比例同步, 则其 EC 值和 pH 值的变化是稳定的。虽说不存在绝对养分均衡的营养液, 但如能保证较好水质, 稳定环境, 良好配方, 那么营养液中的各营养成分随 EC 值和 pH 值的变化也是相对稳定的, 所以此时根据 EC 值和 pH 值管理营养液是可行的, 且国外已有定型产品。但我国目前存在设施水平低下、各地水质和营养液配方差别大、环境控制水平不高等不利因素, 使得 EC 值在营养液管理中的价值降低, 无法根据 EC 值和 pH 值的变化进行营养液的管理, 需在线检测营养液中营养成分的浓度, 才能及时调配营养液, 使营养液始终保持养分均衡。

在我国引进的大型温室中, 营养液的使用几乎都是一次性的, 废弃的营养液富含营养, 不仅造成浪

费, 同时也对环境造成一定程度的污染。如果能够在在线检测营养液的成分, 就可以实现营养液调配, 循环使用营养液, 降低运营成本, 提高经济效益。

1 营养成分的在线检测

1.1 系统基本结构

设施栽培中营养液的成分比较复杂, 不仅含有作物生长所需的主要营养成分, 如氮、磷、钾、钙等, 还含有作物生长必需的微量元素。但检测所有营养成分的浓度不仅不现实, 而且对于营养液的管理也没有必要。我们只需要检测营养液的几个主要指标: 氮 (NO_3^-)、磷 (HPO_4^{2-} 、 PO_4^{3-})、钾 (K^+)、钙 (Ca^{2+})、硫 (S^{2+})、镁 (Mg^{2+}) 的浓度, EC 值和 pH 值。EC 值和 pH 值的测量有成熟的方法, 在此不需赘述^[5]。氮 (NO_3^-)、钾 (K^+)、钙 (Ca^{2+}) 这 3 种离子浓度可以用离子选择性电极^[6]来测量, 而对于磷 (HPO_4^{2-} 、 PO_4^{3-})、硫 (S^{2+})、镁 (Mg^{2+}) 这 3 种离子的浓度由于传感器的限制, 无法直接测量, 我们采用软测量的技术实现这 3 种离子浓度在线估计。

我们开发了一套计算机检测系统, 用来完成营养液中主要指标的在线检测和估计。整个系统由计算机、数据采集板、高阻抗放大器、传感器构成, 其总体结构如图 1 所示。

1.2 离子选择性电极

离子选择性电极是专门用来测量溶液中某种特定离子浓度的一种指标性电极, 是电化学中常用的仪器, 它不仅使用方法简单, 而且测量精度比较高, 完全能够满足营养液管理中精度的要求。离子选择性电极的种类很多, 它们的机理各不相同, 但它们的

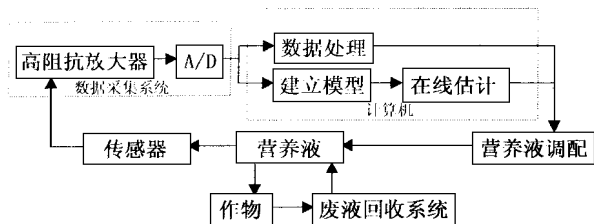


图1 系统结构图

Fig 1 The diagram of system structure

作用原理大体相似。图2是离子选择性电极的基本结构。

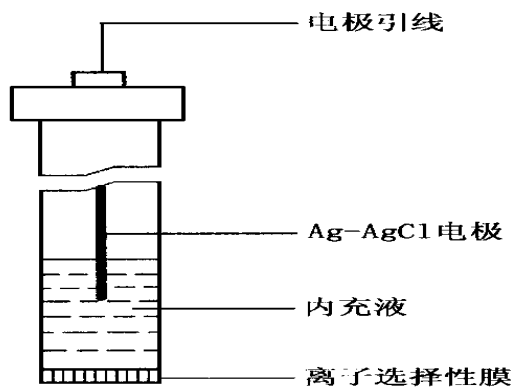


图2 电极结构示意图

Fig 2 The sketch map of electrode structure

一般说来,电极膜对某种离子具有选择性。当电极插入含有该离子的溶液后,由于它和膜上的相同离子进行交换而改变两界面的电荷分布,从而在膜表面上产生膜电势。

膜电势 S 与溶液中阳离子 M^{n+} 的活度 A^+ 的关系,可用能斯特方程来表示

$$S = S^0 + \frac{RT}{ZF} \ln A^+ \quad (1)$$

式中 S^0 中包含膜内表面的膜电势,内参电极的电极电势以及除浓度外其他对电极电势的影响因素; A^+ —— 溶液中离子 M^{n+} 的活度,当溶液中 M^{n+} 的浓度 C 很小时, $A^+ = C$; Z —— 内参电极表面发生电化学反应时,化学反应式中转移的电荷数; R —— 摩尔气体常数, $81314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$; F —— 法拉第常数, $9165 \times 10^4 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$; T —— 绝对温度。

当离子选择性电极与参比电极组成电池后,两电极之间的电势差为

$$E = S - S_{参} = S + \frac{RT}{ZF} \ln A^+ \quad (2)$$

膜电势 S 与溶液中阴离子 R^{n-} 的活度 A^- 的关系,也可用能斯特方程来表示

$$S = S^0 - \frac{RT}{ZF} \ln A^- \quad (3)$$

同理,当该电极与参比电极组成电池后,两电极之间的电势差为

$$E = S - S_{参} = S - \frac{RT}{ZF} \ln A^- \quad (4)$$

根据式(2)或式(4),只要配制一系列 M^{n+} 或 R^{n-} 的已知浓度的标准溶液,并以测得的 E 值与相应的 A^+ 或 A^- 绘制校正曲线,即可用以后的测量值来计算未知溶液浓度。

113 数据采集

离子选择性电极的使用比较简单,其测量输出为毫伏级电压信号,但是其内阻比较大,一般达到 $10^6 \sim 10^7 \Omega$ 。测量 pH 值的玻璃电极内阻更大,最高达 $120 \text{ M}\Omega$,然而一般数据采集板的输入阻抗只有 $10^6 \Omega$ 或者更低,无法直接采样传感器输出信号。为此,我们设计了高阻抗、低漂移放大器,对传感器的输出信号进行放大,其原理如图3所示。

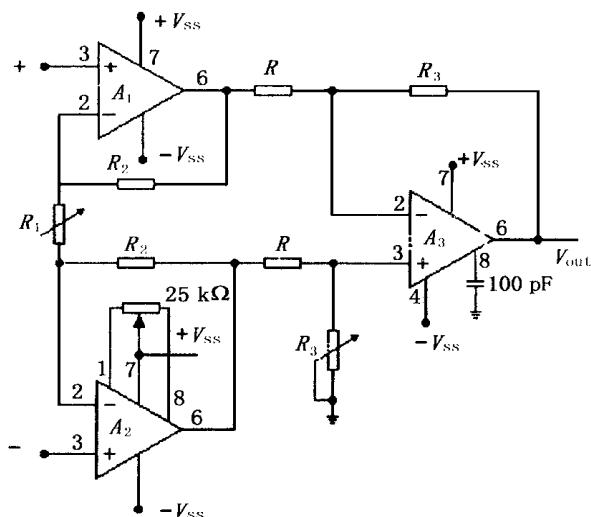


图3 高阻抗、低漂移放大器

Fig 3 The high resisted and low drifted amplifier

在元器件的选用上, A_1 、 A_2 、 A_3 都为高精度低漂移运算放大器,其中 A_1 和 A_2 两个运算放大器要求为高输入阻抗,至少达到 $10^{11} \Omega$ 。我们在实际使用中 A_1 、 A_2 为 LF355,输入阻抗典型值为 $10^{12} \Omega$, A_3 为 LM 208A,其输入输出关系如下

$$V_{out} = \frac{R_3}{R} \left[\frac{2R_2}{R_1} + 1 \right] (V_+ - V_-) \quad (5)$$

通过调节 R_1 可以改变放大倍数。为了提高精度,电阻选用精密电阻。

通过高阻抗放大器对传感器的输出信号放大后,经过 A/D 转换,可以采样到计算机中,再进行数

据处理得到相应的测量数据。

2 磷、硫、镁离子的软测量

由于受传感器的限制, 我们无法对营养液某些组分的浓度, 如磷酸根、硫酸根和镁离子 (Mg^{2+}) 进行快速而准确的现场检测。为了解这些离子变化情况, 不得不采集样品送到实验室去化验分析, 显然因为客观条件的限制, 成本太高, 时间的滞后性等不利因素的制约, 不能随时了解这些离子浓度的变化, 难免会给作物生长带来一定的危害。然而, 在特定作物特定的生长期及生长环境相对稳定的一段时间内, 各营养元素浓度与 EC 值、pH 值之间存在相对稳定的关系, 同时各营养元素的变化也存在一定关系, 我们基于这一基本原理, 采用软测量的技术, 即利用实验数据, 建立特定作物、特定生长期的不可直接测量的营养元素浓度与可在线测量的营养元素浓度以及 EC 值、pH 值之间的数学模型, 然后, 通过在线测量的数据来估计那些不可现场测量的营养元素浓度。表 1 的数据是某生产基地提供的番茄 NFT (营养液培) 栽培中营养液元素在营养液池中的实测数据。

表 1 营养液成分实测数据

Tab 1 Measured data of nutritive medium ingredient

mg L ⁻¹							
N	P	K	Ca	Mg	S	pH	EC
243	50	290	150	48	72	612	217
200	38	230	120	40	61	616	211
160	30	190	91	29	48	711	116
109	21	120	72	25	31	711	116
72	10	80	50	24	21	710	116
40	3	62	50	24	18	711	116
17	0	47	50	24	18	711	116

分析这些数据, 我们发现 N、P、K、Ca、Mg、S 等营养元素的变化基本呈线性关系, pH 和 EC 值在营养液浓度比较高的时候, 变化也成一定的比例关系, 当营养液中浓度比较低时, pH 值和 EC 值的变化非常微弱, 在检测的精度范围内基本保持不变。因此用线性模型来估计磷、镁和硫的离子浓度, 模型如下

$$y(k) = a_0 + a_1N(k) + a_2K(k) + a_3Ca(k) + a_4pH(k) + a_5EC(k) + e(k) \quad (6)$$

$k = 1, 2, \dots, N$

式中 $y(k)$ —— 磷、镁或硫离子浓度; $N(k)$, $K(k)$, $Ca(k)$, $pH(k)$, $EC(k)$, $e(k)$ —— 分别为氮, 钾, 钙离

子浓度, pH 值, 电导率和模型的残差。我们选用经典的最小二乘法来辨识模型的参数, 辨识的结果如表 2 所示。

表 2 辨识结果

Tab 2 Identified results

结果	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
P	- 231107	0127	- 0110	0110	26172	23117
Mg	215154	- 0102	0104	0113	- 25165	- 12147
S	230100	- 0101	- 0117	0127	- 26192	- 30107

使用上述模型对同一组数据中的磷进行仿真, 结果如图 4 所示: 图中实线表示磷的实测数据, 星号表示通过模型计算出的磷含量。可以看出实际测量值和模型估算值比较接近, 在中间一段区域内, 拟合的很好, 在磷含量很低时, 有一定偏差, 但是这种情况在实际生产过程中一般不会发生。镁、硫的仿真曲线和实际曲线也非常吻合。

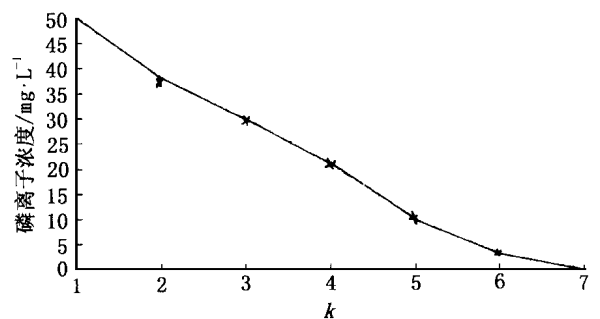


图 4 磷仿真曲线

Fig 4 The emulated curve of Phosphorus

使用上述模型对另外的实验数据进行检验, 估计值与实测值同样比较吻合, 证明上述模型基本能够反映营养元素之间, 以及与 EC 值、pH 值的关系。随着实验数据的积累, 可以不断修正模型参数, 使之更接近实际的变化关系。

应该指出的是, 不同作物对营养元素的需求量是不同的, 同一种作物不同生长期对营养元素的需求也是不同的, 因此上述模型只适合于番茄某一生长期。

3 结论

营养元素的在线检测在提高营养液管理水平、降低经济运行成本、提供操作指导等方面有比较高的实用价值。软测量技术是一种经济、适用的方法, 通过对不可直接测量的营养元素进行估计来间接测量其浓度, 这种方法也可以推广到化工、环境监测等

领域。

[参 考 文 献]

- [1] 连兆煌 无土栽培原理与技术 北京: 中国农业出版社, 1992
- [2] 陈春宏, 田吉林 上海引进温室肥水管理现状及亟待解决的问题 设施农业相关技术国际研讨会论文集, 1998 149~ 155
- [3] M R Bradley & Segal Hydroponic system for the production of greenhouse crops Proceeding of the International Seminar and British/Irish Workshop on Greenhouse Technology, Bet Dagan (Israel), 1990 149~ 154
- [4] FAO. The Soilless Culture for the Horticulture Crops The FAO Technical papers, 1991
- [5] 森村正直等(孙宝元译). 传感器工程学 大连: 大连工学院出版社, 1988
- [6] R. A 德斯特 离子选择性电极 北京: 科学出版社, 1976

The On-line Measurement of the Nutritive Medium Ingredient in Greenhouse Culture

Qiu Xuefeng Xue Meisheng Sun Demin Zhang Jianlong

(Department of Automation, USTC, Hefei 230026)

Abstract: In order to reinforce the nutritive medium management and to recycle the nutritive medium in greenhouse culture, it is required to measure the value of EC, pH and the content of nutrients online, thus adjust every ingredient to equilibrium in time. In this paper, application of ion-selective electrode implements the online measurement of some ingredients, such as the concentrations of ions of Nitrogen, Kalium, and Calcium, EC and pH, and implements the soft-sense of the concentrations of ions of Phosphorus, Sulfur and Magnesium according to the relative stable relation of concentrations of every ingredient and the value of EC, pH in a period when growth circumstance is relatively stable for special crop in special growing period, as well as the relation among variation of every ingredient.

Key words: greenhouse culture; nutritive medium; soft-sense