doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.07.027

基于离子活度的水培生菜营养液调控方法研究

孙章彤[1,2]　颜浩然[3]　杨永霞[1,2]　孙大虎[2,3]　胡旭东[2,3]　胡　瑾[1,2]

(1. 西北农林科技大学信息工程学院，陕西杨凌 712100；2. 农业农村部农业物联网重点实验室，陕西杨凌 712100；
3. 西北农林科技大学机械与电子工程学院，陕西杨凌 712100)

摘要：营养液动态调控是无土栽培系统重要环节，监测回用溶液的营养状况，确保将养分有效地补充到最佳浓度，以实现循环利用并降低经济成本至关重要，但营养液组分在线检测较为困难。本研究提出了一种基于 pH 值、电导率(Electrical conductivity，EC)、NO_3^- 和 NH_4^+ 离子活度的其他主要离子软测量方法，并设计了相应的软硬件调控平台。首先，水培生菜全周期采用园试通用配方，依据离子活度和 EC 贡献率计算公式，研究营养液组分的变化规律。结果表明，离子活度对营养液 EC 的影响具有可叠加性以及离子 EC 贡献率具有相对稳定的特性；随后，利用支持向量机回归算法(Support vector regression，SVR)和遗传算法(Genetic algorithm，GA)分别建立 Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^+ 离子活度回归模型，模型最优决定系数与均方根误差分别为 0.965 1、0.972 4、0.954 0 和 0.014 6、0.026 2、0.143 7 mmol/L；其次，设计该配方下的多离子浓度调控策略；最后，搭建软硬件调控平台，实现水肥状态检测和肥液补充。验证试验显示，定植后 0～10 d 养分吸收量较少，均为补液后第 5 天执行调控指令；定植后 10～30 d 养分吸收速率迅速增加，依据吸收量明显增加的钾、氮元素进行调控；至收获期养分总吸收量虽然增加，但吸收速率显著下降，依据吸收速率相对最快的钙元素进行调控。结果表明，本研究将固定配方的营养液 EC 控制水平提高到离子浓度控制水平，为满足作物生产对营养液离子浓度的动态需求提供理论依据。

关键词：水培生菜；营养液离子调控策略；EC 贡献率；离子活度；支持向量机

中图分类号：S126　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2025)07-0288-12　　**OSID**：

Control System of Nutrient Solution for Hydroponic Lettuce Based on Ion Activity

SUN Zhangtong[1,2]　YAN Haoran[3]　YANG Yongxia[1,2]　SUN Dahu[2,3]　HU Xudong[2,3]　HU Jin[1,2]

(1. *College of Information Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*
2. *Key Laboratory of Agricultural Internet of Things*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*
3. *College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: Dynamic regulation of nutrient solution is an important part of soilless cultivation systems. Monitoring the nutritional status of reused solutions to ensure effective supplementation of nutrients to the optimal concentration is crucial for achieving recycling and reducing economic costs. However, online detection of nutrient solution components is challenging. A soft sensing method for other major ions was proposed based on pH, EC, nitrate and ammonium ion activities, and corresponding control software and hardware systems were designed. Firstly, the entire cycle of hydroponic lettuce was conducted by using a universal formula for horticultural experiment. Based on the calculation formulas for ion activity and EC contribution rate, the variation patterns of nutrient solution components were studied. The results showed that the effect of ion activity on nutrient solution EC was stackable and the contribution rate of ion EC was relatively stable. Support vector regression (SVR) and genetic algorithms (GA) were used to establish Ca^{2+}, Mg^{2+}, and K^+ ion activity regression models. The optimal determination coefficient and root mean square error of the models were 0.965 1, 0.972 4, 0.954 0, and 0.014 6 mmol/L, 0.026 2 mmol/L,

收稿日期：2024－07－30　修回日期：2024－08－21

基金项目：国家重点研发计划项目(2024YFD2001004－02)、中国博士后科学基金项目(2024M762637)和陕西省重点研发计划项目(2023－ZDLNY－66)

作者简介：孙章彤(1999—)，男，博士生，主要从事设施环境调控研究，E-mail：sunzhangtong@nwafu.edu.cn

通信作者：胡瑾(1980—)，女，教授，博士生导师，主要从事设施环境调控和智能信息处理研究，E-mail：hujin007@nwsuaf.edu.cn

0.143 7 mmol/L. Secondly, a multi ion concentration control strategy for the universal formula of garden trial leafy vegetables was designed. Finally, a control system for hardware and software was established to achieve detection and supplementation of water and fertilizer status. The validation experiment showed that the nutrient absorption was relatively small in the 0 ~ 10 days after transplanting, and the control instruction was executed on the 5th day after adding liquid; the nutrient absorption rate was increased rapidly in the 10 ~ 30 days after transplanting, and the control was carried out based on the increase of potassium and nitrogen elements that were obviously absorbed; in the harvest period, the total nutrient absorption was increased, but the absorption rate was decreased significantly, and the control was carried out based on the calcium element that had the fastest relative absorption rate. The results showed that the research improved the EC control level of nutrient solution to the level of ion concentration control, providing theoretical basis for meeting the dynamic nutrient solution ion concentration requirements of crop production.

Key words: hydroponic lettuce; ion regulation strategy of nutrient solution; EC contribution rate; ion activity; support vector machine

0　引言

随着设施农业的发展,无土栽培和水肥一体化技术越来越普遍地应用于现代农业生产[1-4]。在无土栽培系统中,营养液的合理配置、调控和管理非常重要[5-6]。由于作物对营养液中各元素需求存在差异,因此如何对营养液进行动态调控已经成为无土栽培系统实际操作中亟需解决的一个重要问题。现有系统常通过实时检测 pH 值和电导率(Electrical conductivity, EC)来监测营养液中的盐分含量和酸碱平衡以实现营养液的调节[7-10],但仅依靠此类方法不能解决因作物吸收差异而导致的营养液成分失衡问题,且不能反映营养液中单一元素浓度及各组分比例变化。因此,准确实时获取各离子浓度信息已成为营养液调控方式升级的关键。

近年来,由于营养液组分在线监测技术的发展,越来越多学者考虑直接将各离子浓度作为营养液调控依据,通过引入高光谱信息、介电传感器、离子选择电极阵列或构建虚拟离子软测量模型等方法获取营养液实时离子浓度。其中,基于光谱信息融合的设施栽培营养液离子检测设备可实现对营养液中 Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^+、NH_4^+ 等离子浓度的同步快速检测,但设备成本较高,精准度差,平均误差为 ±15%[11];基于介电特性的营养液离子检测技术精度高,可利用频率响应快速检测和鉴别营养液各离子的浓度及种类,但仅限于实验室使用,尚未广泛应用于现场实时检测,且易受现场环境因素影响[12-13];基于离子选择电极阵列测量营养液中各种离子的浓度可以反映营养液中单一元素浓度及各组分比例等变化,但在线式测量设备价格昂贵,使用寿命短,存在交叉敏感问题。特别是对于 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 离子的在线测量,灵敏度低且选择性差,性能不理想[14-15];同时,基于神经网络、支持向量机回归等智能算法构建的虚拟离子选择电极软测量方法能够对在线测量灵敏度低的离子进行估计[16-17],预测效果有所提升,但现有研究直接将 EC 和离子浓度作为模型输入和输出因子,未考虑 EC 和离子浓度的物理化学关系。事实上,营养液作为浓度较低的强电解质溶液,适用于 Debye-Hückel 理论[18],离子之间的相互作用使各离子不能完全发挥对 EC 的影响,混合溶液的 EC 实际上是离子活度(离子发挥作用的浓度)相互作用的结果,各离子对 EC 的贡献不仅与浓度有关,而且与离子特性密切相关[19-20]。因此,通过研究离子活度和 EC 的关系来提升模型预测精度是将营养液 EC 控制水平提升到离子精准调控水平的关键。

因此,为实现营养液离子浓度水平的动态调控,本文以水培生菜为试验材料,全周期采用园试通用配方,分析水培过程中离子活度与 EC 之间的关系及离子 EC 贡献率的动态变化,构建主要离子的离子活度回归模型,并提出基于多离子活度预测模型的园试通用配方营养液调控策略及开发相应装备。以期通过营养液 EC、pH 值、NO_3^- 离子浓度和 NH_4^+ 离子浓度的实际测量,结合营养液离子调控策略,满足水培生菜全周期对离子浓度的动态调控需求。

1　离子活度回归模型

1.1　试验设计与数据获取

本试验于 2023 年 3—6 月在西北农林科技大学农业农村部农业物联网重点实验室(34°07′39″N, 107°59′50″E,海拔 648 m)进行。以香港玻璃生菜(*Lactuca sativa* L. cv. 'Hong Kong glass')为试验对象,以园试通用营养液作为特定盐类配方,化合物选择如表 1 所示。

首先,参考园试通用配方中各单盐的阳离子浓度为基准,将各单盐设置成一定的浓度梯度,进行标

表 1 园试通用配方

Tab. 1 General formula for garden trial leaf vegetables

单盐溶液	浓度/(mmol·L^{-1})	质量浓度/(mg·L^{-1})	大量元素
$Ca(NO_3)_2·4H_2O$	4	944.60	N、Ca
$MgSO_4·7H_2O$	2	493.34	Mg
KNO_3	8	808.80	N、K
$NH_4H_2PO_4$	1.33	153.37	N、P

定试验,研究单盐溶液中各离子活度与 EC、pH 值之间的关系;并参考园试通用配方,设置了营养液标准浓度的不同倍数梯度,进行标定试验,研究不同浓度营养液中各离子活度与 EC、pH 值的关系;其次,在水培条件下,按照园试营养液配方进行管理。设置 4 组试验,在生菜的生长期间,分别每隔 4、5、6、7 d 进行补液操作,将当前的营养液调整至园试通用配方标准浓度,且每日固定时间测量 3 次营养液 EC、pH 值及各离子浓度,并计算离子 EC 贡献率,试验共计 45 d,累计获取 540 组数据。

采用便携式多参数分析仪(RMD－ISHC20 型和 RMD－ISEC20 型)测量营养液 EC、pH 值。采用便携式离子仪(Bante321 型)测量硝态氮和铵态氮;基于火焰发射法采用原子吸收分光光度计(AA－7002 型,北京东西分析仪器有限公司)在 766.49 nm 处测量钾离子,其中仪器火焰缝宽度为 0.2 nm,空气乙炔燃气流量为 1.6 L/min;采用流动分析仪(XY－2 型,SEAL Analytical)测量 Ca^{2+}、Mg^{2+} 离子。

1.2 离子活度计算公式

设施无土栽培营养液属于浓度较低的强电解质溶液,适用于 Debye-Hückel 理论,营养液中离子之间的相互作用使各离子不能完全发挥对 EC 的影响,混合溶液的 EC 实际上是离子发挥作用的浓度相互作用的结果。由于离子之间的相互作用使得各离子不能完全发挥对其浓度的影响,因此将离子发挥作用的浓度称为离子活度(T_i,mol/L),其中,离子活度是表征离子发挥作用的有效浓度,营养液离子活度计算式为

$$T_i = \gamma_i C_i \tag{1}$$

式中 γ_i——离子活度系数

C_i——离子浓度,mol/L

离子活度系数 γ_i 可以衡量实际溶液与理想溶液之间偏差的大小,为溶液热力学参数,根据 Debye-Hückel 极限定律,利用离子的体积参数、离子活度系数及离子强度等进行计算,计算式为

$$-\lg\gamma_i = \frac{AZ_i^2\sqrt{I}}{1 + Br_i\sqrt{I}} \tag{2}$$

式中 A——与温度有关的常量,取 0.509 1(25℃)

B——与离子大小有关的常量,取 0.328(25℃)

Z_i——离子所带电荷数

r_i——与离子种类相关的常量

I——溶液离子强度,mol/L

离子强度 I 表征溶液中存在的离子所产生的电场强度,其计算公式为

$$I = \frac{1}{2}\sum C_i Z_i^2 \tag{3}$$

各离子影响营养液 EC 的百分比被定义为离子 EC 贡献率(Ionic EC contribution percentage,EC_i),由离子活度和极限摩尔电导率计算,计算式为

$$EC_i = \frac{|Z_i|\ T_i\lambda_\infty}{\sum(|Z_i|\ T_i\lambda_\infty)} \times 100\% \tag{4}$$

式中 EC_i——离子 EC 贡献率,%

λ_∞——极限摩尔电导率,m^2·S/mol

由于离子活度是通过计算离子强度、离子活度系数等推导所得,为保证测量精度,水培生菜全周期采用园试通用配方。从式(2)、(3)中发现离子种类会影响离子活度和 EC 贡献率的计算,因此本研究首先探究不同离子活度与 EC、pH 值之间的关系,为构建不同离子活度回归模型提供理论支持与基础。

1.3 试验结果分析

1.3.1 单盐溶液中各离子活度与 EC、pH 值的关系

离子活度表示营养液中有效发挥作用的离子浓度,而营养液电导率是多种离子活度共同作用的结果。回归分析发现,在一定营养液浓度范围内,单盐营养液中离子活度与其电导率之间存在相关关系,结果如图 1 所示;离子活度与 pH 值之间的相关关系如图 2 所示。

从图 1 可以看出,单盐营养液中离子活度与电导率之间存在显著线性相关关系。同一营养液中,单盐离子组成决定各离子对电导率的影响。例如,对于 KNO_3、$MgSO_4·7H_2O$ 和 $NH_4H_2PO_4$ 等 1∶1 阴阳离子组成的单盐溶液,阴阳离子的活度与电导率之间的相关关系相似,说明这些阴阳离子对电导率的贡献相同。然而,对于 $Ca(NO_3)_2·4H_2O$,其阴阳离子的比例为 2∶1,其中阴离子离子活度与电导率的线性回归系数约为阳离子的两倍。这表明,离子对营养液电导率的作用不仅与离子的浓度有关,还与化学式中阴阳离子比例有直接关系。因此,离子活度反映了其在溶液中有效参与导电的能力,比离子浓度更能准确表征离子实际贡献。

从图 2 可以看出,单盐营养液中离子活度与 pH

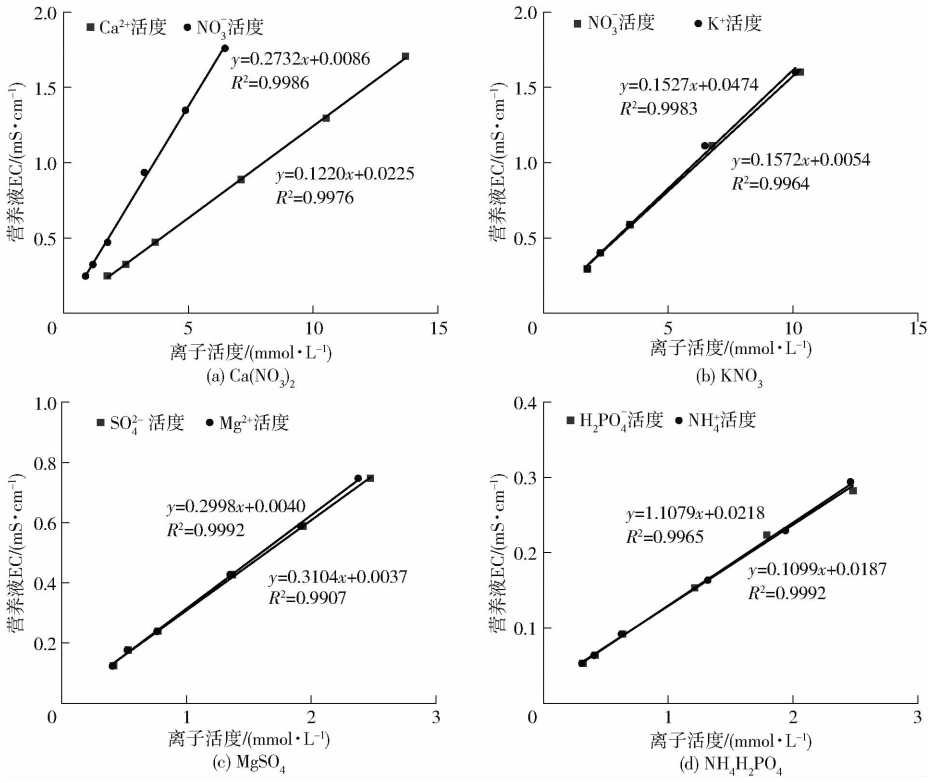


图 1　单盐营养液中各离子活度与其 EC 之间的关系

Fig. 1　Relationship between ion activity and EC in single salt nutrient solution

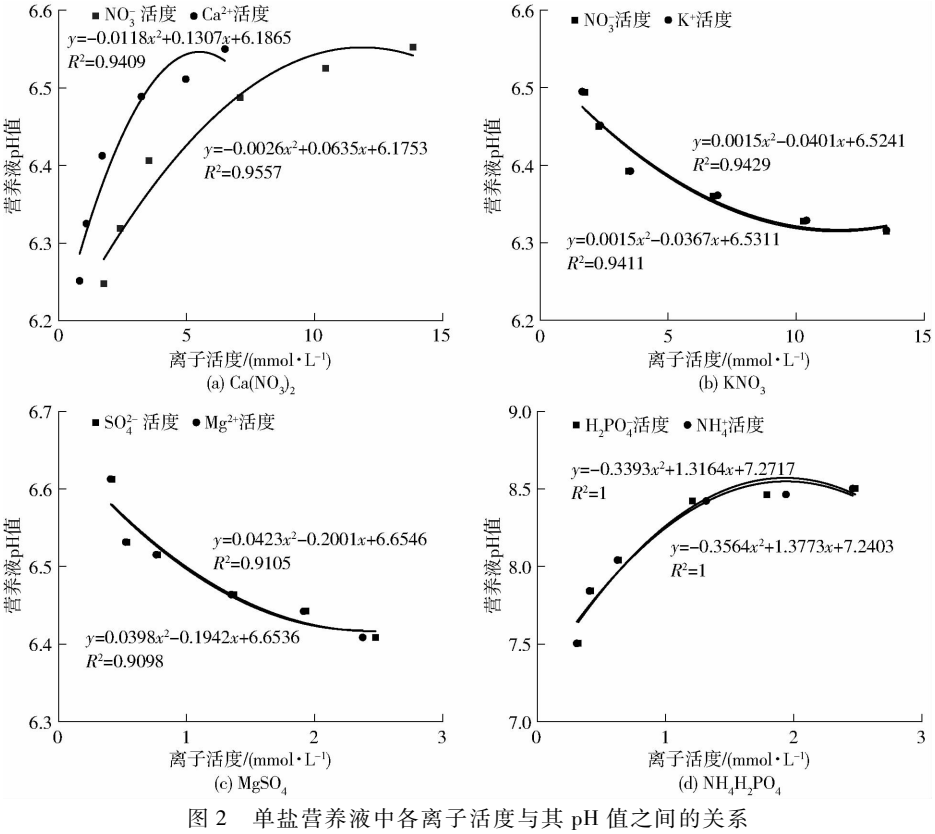


图 2　单盐营养液中各离子活度与其 pH 值之间的关系

Fig. 2　Relationship between ion activity and pH in single salt nutrient solution

值之间存在显著二次相关关系。与电导率类似，对于 KNO_3、$MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 和 $NH_4H_2PO_4$ 等 1∶1 阴阳离子组成的单盐营养液，其阴阳离子的活度与 pH 值之间的相关性较为一致。然而，由于各单盐酸碱性不同，并没有表现出一致规律。因此，在配制营养液时，需依据营养液的 pH 值选择合适单盐，即能将营养液的 pH 值维持在植物生长所需的范围内的单盐，以优化植物生长环境。

1.3.2 不同浓度营养液中各离子活度与 EC、pH 值的关系

根据植物在各生长时期对营养液不同离子浓度的需求，参考园试通用配方，设置了营养液标准浓度的不同倍数梯度，进行标定试验。不同浓度营养液中离子活度与其 EC、pH 值相关性分析如表 2 所示。

表 2 不同浓度营养液中离子活度与其 EC、pH 值的相关性分析

Tab. 2 Correlation analysis of ion activity with EC and pH in nutrient solutions of different concentrations

离子	离子活度与 EC 关系		离子活度与 pH 值关系	
	回归方程	R^2	回归方程	R^2
NO_3^-	$EC = 5.473T_i - 0.155$	0.995	$pH = 34.986T_i^2 - 419.221T_i + 1\,478.577$	0.998
$H_2PO_4^-$	$EC = 0.482T_i - 0.031$	0.949	$pH = 3.593T_i^2 - 42.364T_i + 134.089$	0.976
SO_4^{2-}	$EC = 0.705T_i - 0.038$	0.981	$pH = 4.958T_i^2 - 66.784T_i + 244.278$	0.974
K^+	$EC = 2.780T_i + 0.021$	0.992	$pH = 15.493T_i^2 - 198.215T_i + 742.426$	0.985
Ca^{2+}	$EC = 1.357T_i - 0.089$	0.960	$pH = 9.926T_i^2 - 128.819T_i + 440.768$	0.997
Mg^{2+}	$EC = 0.696T_i - 0.028$	0.994	$pH = 4.691T_i^2 - 65.923T_i + 203.491$	0.986
NH_4^+	$EC = 0.443T_i - 0.004$	0.926	$pH = 2.339T_i^2 - 36.038T_i + 104.982$	0.946

从表 2 可以看出，不同浓度下，各离子活度与 EC 之间存在显著线性相关关系，与单盐溶液情况一致。然而，这些回归方程与单盐溶液不同，表明混合溶液中的各单盐离子存在明显互作作用，影响了离子浓度对营养液 EC 的完全发挥。此外，$MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 同时提供了 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 2 种同价态的营养离子，这 2 种离子活度与 EC 回归方程的斜率相近。尽管 KNO_3 和 $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ 都提供了 NO_3^-，根据各离子浓度的加权平均，K^+ 和 Ca^{2+} 的离子活度与 EC 回归方程的斜率也与 NO_3^- 相近，这说明离子活度对营养液 EC 的影响具有可叠加性，也为分析各离子对 EC 的贡献率提供了理论基础。

1.3.3 水培管理中各离子活度对 EC 贡献率影响

营养液中每种离子的离子浓度、带电荷量及离子半径等不尽相同，这导致各离子之间的导电性存在很大差异，故各离子对混合溶液的 EC 贡献量也有所不同。但由于作物栽培用营养液是极稀电解质溶液，其浓度变化的范围有限。因此，分别每隔 4、5、6、7 d 进行补液调整，并单独计算每天的离子 EC 贡献率。结果表明，不同浓度营养液中各离子 EC 贡献率的变化范围较小。在水培生菜正常生长时，每隔 4、5 d 更换营养液时，园试通用配方营养液中各离子 EC 贡献率的变化范围均在 2% 以内，仅 NO_3^- 的离子 EC 贡献率变化在 5% 以内。而每隔 6、7 d 更换营养液时，EC 贡献率的比例平衡逐渐被打破，尤其是在每隔 7 d 更换营养液后更加明显，与骆洪义等[21]研究结论一致，这是因为特定配方的营养液组成及其实际使用的水溶肥并不一定能够达到完全平衡或者完全符合 Debye-Hückel 极限定律的边界条件。为此，在正常生长过程中的一定营养液浓度范围内，随着营养液浓度变化，各离子对其 EC 贡献率的变化可以忽略不计。该结果揭示了基于该离子 EC 贡献率相对稳定的特性，可以利用 EC 实际测量掌握特定配方营养液的各离子活度与 EC 之间的关系，为后续建立离子活度回归模型提供了理论基础。

1.4 模型构建与结果对比

综合考虑试验结果，为了保证营养液组分在线检测需求，以每隔 5 d 更换营养液的 135 组原始试验数据作为样本集，利用支持向量机回归算法（Support vector regression，SVR）和遗传优化算法（Genetic algorithm，GA）分别建立 Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^+ 离子活度回归模型。支持向量回归是一种基于支持向量机（Support vector machine，SVM）的回归算法。与传统的线性回归方法不同，SVR 利用核技巧（Kernel trick）将输入空间映射到高维特征空间，从而在高维空间中寻找最佳的超平面来拟合数据。由于 SVR 的性能受到模型参数的选择以及核函数的影响，而遗传算法作为一种基于自然选择和遗传机制的优化算法，模拟了生物进化过程中的自然选择、交叉和变异等过程，通过对解空间中个体的群体搜索来寻找问题的最优解或近似最优解[22]。本研究所建立的 Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^+ 离子活度回归模型，以实测 EC、pH 值及计算所得的 NO_3^-、NH_4^+ 离子活度作为输入，以 Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^+ 离子活度分别作为输出。

1.4.1 数据集划分及算法参数选择

利用支持向量机对模型训练前，需对不同维度样本数据分别作归一化处理，避免因数据差异过大导致样本不均衡，使得最终模型偏离准确超平面。归一化区间选择为[0.2，0.8]。将归一化后的样本集数据的 80% 作为训练集，20% 作为测试集，分别用于模型训练和泛化能力评价。归一化公式为

$$x' = \frac{0.6(x - x_{\min})}{x_{\max} - x_{\min}} + 0.2 \tag{5}$$

式中 x——待归一化原始数据

x'——归一化后待处理数据

x_{max}、x_{min}——输入数据中某维度最大、最小值

本模型特征数为 4，样本数量为 135，核函数选择高斯径向基核函数，正则化参数 c 索引范围为[10, 60]，核函数参数 g 索引范围为[0.01, 10]，遗传算法同时设置 c 基因个数为 8 个，g 基因个数为 7 个。算法进化曲线如图 3 所示。当网络进化到最终收敛时，模型达到最大决定系数，Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^+ 离子活度回归模型参数 c 和 g 最佳解分别为 55.524 1、46.248 5、52.416 8 和 0.471 8、0.219 3、0.645 8。模型训练过程中未出现振荡，证明遗传算法对支持向量机参数优化效果明显。

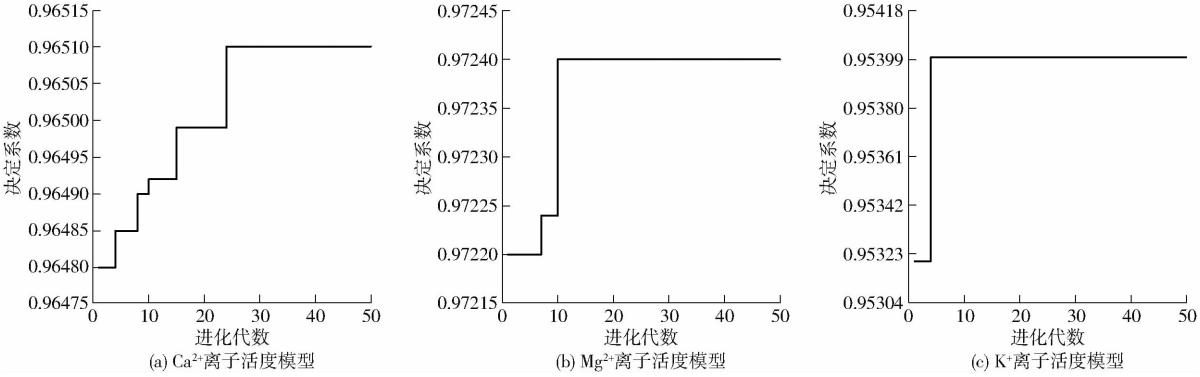


图 3　遗传算法进化曲线

Fig. 3　Evolution curves of genetic algorithm

对于给定的训练样本集，利用 GA－SVR 算法进行拟合，得到最终离子活度预测初始模型，将各模型参数代入，最终获得融合核技巧的离子活度回归模型，具体计算公式为

$$f(\boldsymbol{X}) = \boldsymbol{\omega}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X} + \boldsymbol{b}' \tag{6}$$

$$f(\boldsymbol{X}) = \sum_{i=1}^{m} (\hat{a}_i - a_i) K(\boldsymbol{X}, \boldsymbol{X}^p) + \boldsymbol{b}^* \tag{7}$$

$$K(\boldsymbol{X}, \boldsymbol{X}^p) = \exp\left(-\frac{\| \boldsymbol{X} - \boldsymbol{X}^P \|^2}{2\sigma^2}\right) = \exp(-g \| \boldsymbol{X} - \boldsymbol{X}^p \|^2) \tag{8}$$

式中　$\boldsymbol{X}$——模型输入，包括 EC、pH 值、NO_3^- 离子浓度、NH_4^+ 离子浓度

$f(\boldsymbol{X})$——模型输出，即 Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^+ 离子活度

$\boldsymbol{\omega}$——模型系数矩阵

$K(\boldsymbol{X}, \boldsymbol{X}^p)$——核函数

σ——高斯核的带宽参数

g——核函数中的参数

$\boldsymbol{X}$——待变换样本　　$\boldsymbol{X}^p$——核函数中心

$\boldsymbol{b}'$——模型偏置项

$\hat{a}_i$、a_i——求解过程的拉格朗日乘子

$\boldsymbol{b}^*$——使用核技巧后的模型偏置项

1.4.2　不同算法的性能比较

基于 Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^+ 离子活度回归模型对测试集的预测值与真实值拟合结果的拟合方程斜率分别为 0.978 8、0.997 1、0.986 8，接近于 1，而其截距分别为 0.003 6、0.001 0、0.005 2，近似为 0，说明 GA 优化的模型结果精确且泛化能力更强，其对未知数据的预测结果与真实值相关性更高。为了验证利用 GA－SVR 算法所建立模型的性能，与常用的基于网格寻优的 SVR、后向传播神经网络（Back propagation，BP）、随机森林（Random forest，RF）算法进行了对比，结果如图 4 所示。

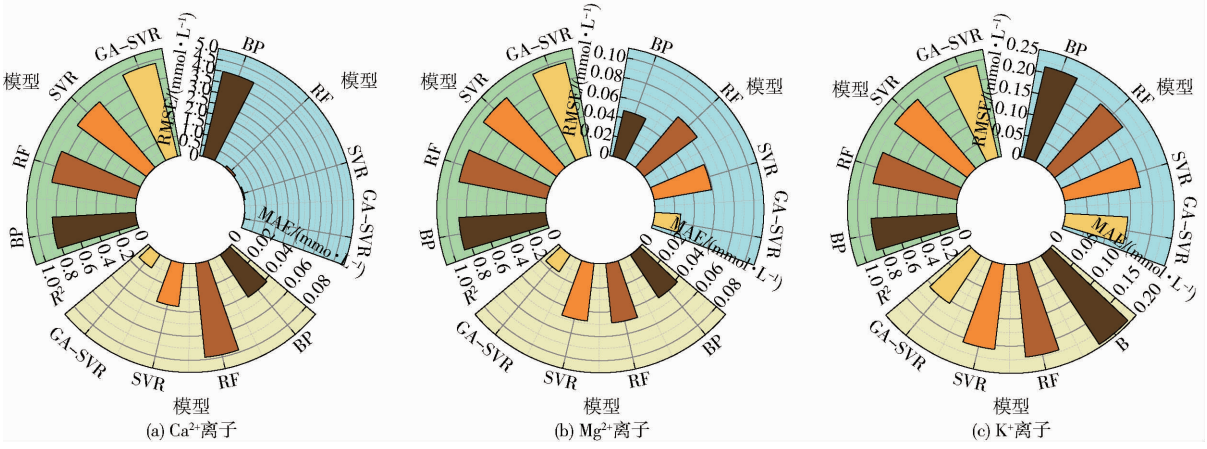


图 4　不同算法性能比较

Fig. 4　Performance comparisons of different algorithms

从图 4 可以看出,网格搜索优化的 SVR 算法在建模精度方面明显优于 BP 神经网络和 RF 随机森林算法,显示出其较高的拟合精度和泛化能力。然而,由于网格搜索在模型参数优化过程中非常耗时,计算效率较低。相比之下,遗传算法作为一种随机全局搜索和优化方法,训练速度更快,GA - SVR 算法决定系数和均方根误差均表现出最佳性能,从而验证了该方法的优越性。

获取离子活度回归模型后,根据式(1)即可计算出各离子浓度。

1.5 调控策略

由于 EC 贡献率具有相对稳定性,即在正常生长过程中的一定营养液浓度范围内,随着营养液浓度的变化,各离子对其 EC 贡献率的变化可以忽略不计。因此,基于多离子活度回归模型,设计了园试通用配方营养液调控策略,具体流程如下:

首先,每日在固定时间点进行营养液多组分在线检测,包括电导率(EC)、酸碱度(pH 值)、硝态氮(NO_3^-)离子浓度和铵态氮(NH_4^+)离子浓度。同时,基于离子活度回归模型获取钙离子(Ca^{2+})、镁离子(Mg^{2+})和钾离子(K^+)的浓度。若其中任一离子的实时浓度低于通用配方中的 90%,则采取措施将所有离子的浓度补充至标准配方水平。具体而言,通过添加 $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 来补充营养液中的镁离子浓度,此举可单独提供镁离子而不引入其他主要离子。在充分搅拌均匀后,依次优先添加 $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ 来补充营养液中的钙离子浓度,KNO_3 来补充营养液中的 K^+ 离子浓度,以及 $NH_4H_2PO_4$ 来补充营养液中的 $H_2PO_4^-$ 离子浓度,以确保营养液中除氮外的各种离子浓度达到理想水平;最后,若营养液中氮的浓度偏低,可通过添加 $NaNO_3$ 来提高其浓度,以达到氮的调节目的,但不向营养液中添加新的离子。

若所有离子的实时浓度均高于通用配方中的 90%,则不进行调节操作。根据前期试验结果,水培生菜在全生长周期内采用园试通用营养液配方时,任一生长阶段的 5 d 内的 EC 贡献率相对稳定,各离子的 EC 贡献率变化范围均在 2% 以内,只有硝态氮的 EC 贡献率变化在 5% 以内。因此,若前 4 d 未进行调控操作,则第 5 天不论离子实时浓度多大均进行补液。

2 监控平台设计

本平台采用模块化设计,开发了基于离子活度回归模型的水肥状态实时检测及调控平台,包括传感器监测、数据分析决策及可视化和控制子平台,其结构框图如图 5 所示。其中,传感器检测子平台包

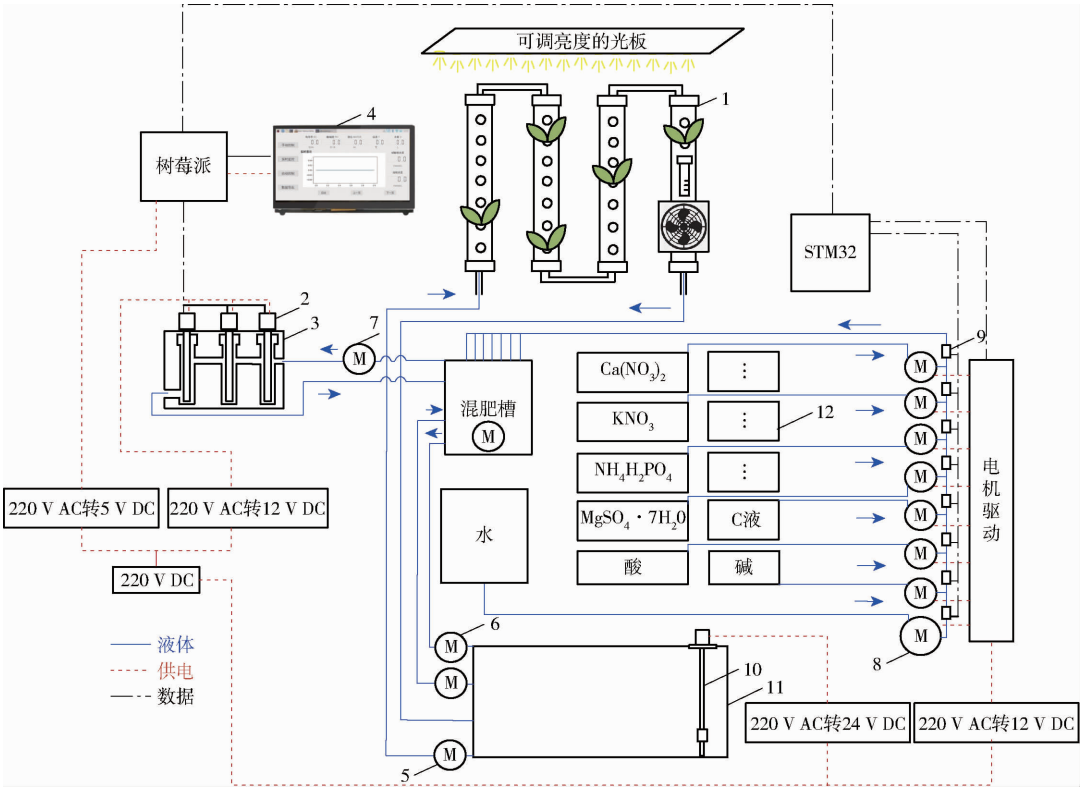


图 5 营养液离子动态调控设备硬件组成示意图

Fig. 5 Hardware composition diagram of nutrient solution ion dynamic regulation equipment

1. 多孔管 2. EC、pH 值及离子(NO_3^- 和 NH_4^+)电极传感器 3. 流通槽 4. 触摸屏 5. 主水泵 6. 循环水泵 7. 检测水泵 8. 补液水泵组 9. 水流量传感器 10. 液位传感器 11. 营养液桶 12. 补液桶

括温度、pH 值、电导率、水流量及液位等传感器，将感知信息通过 RS485 转 USB 传输至数据分析决策及可视化子平台，通过调用移植到嵌入式设备的离子活度回归模型及调控策略动态计算主要离子实时浓度及补液量信息，发送至控制子平台，控制补液电机执行，进而实现水肥状态实时监测、各通道肥液补充量计算及调控功能。

2.1　系统硬件设计

2.1.1　控制节点

控制节点以 STM32F103 芯片为核心，实现多路电机驱动、各通道补液调控等功能。采用模块化设计，主要包括 BPH－DLS20B 型直流有刷电机蠕动泵、TA6586 型电机驱动和 YF－S401 型水流量传感器等模块，其结构如图 6 所示。TA6586 型电机驱动模块通过调整脉冲宽度调制（Pulse width modulation，PWM）所需的占空比控制电机转速，实现精准补液操作；同时，YF－S401 型水流量传感器检测流经的水量，并将脉冲信号传送回 STM32F103 芯片，通过计数和处理脉冲信号，实时检测水流量；同时，STM32F103 芯片接收来自上位机发送的调控指令，动态调整电机开度，控制水肥补液量。

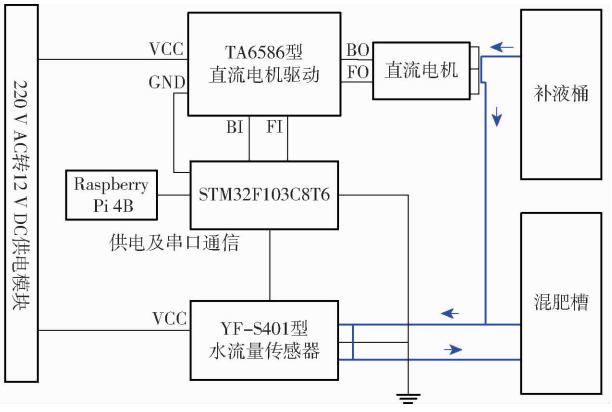


图 6　控制节点结构框图

Fig. 6　Control node structure block diagram

2.1.2　监测及决策节点

监测及决策节点以 Raspberry Pi 4B 为核心，实现营养液组分数据采集与传输、数据分析决策及可视化等功能。主要包括电源单元、无线通信单元、电导率检测、pH 值检测、液位检测、离子浓度检测及决策等模块。具有实时获取营养液组分信息、计算各通道肥液补充量和发送各通道肥液调控值等功能，结构如图 7 所示。其中，营养液组分信息采集及处理模块主要监测电导率、pH 值、液位和离子浓度。电机驱动模块通过 GPIO 引脚与多路继电器相连来控制循环和检测水泵，采用 TA6586 芯片，能够独立双向控制 2 个直流电机，相对于传统的 L298N，效率更高。电导率检测、pH 值检测、液位检测和离子浓度检测模块采用 MODBUS 通信协议中的 RTU 子集，检测后的信号通过 RS485 转 USB 总线传输至树莓派单元。树莓派单元调用嵌入的离子活度回归模型及调控策略，通过比较离子实时浓度与目标浓度，计算需要补充的肥液量，将调控值输出给控制节点执行补液操作。

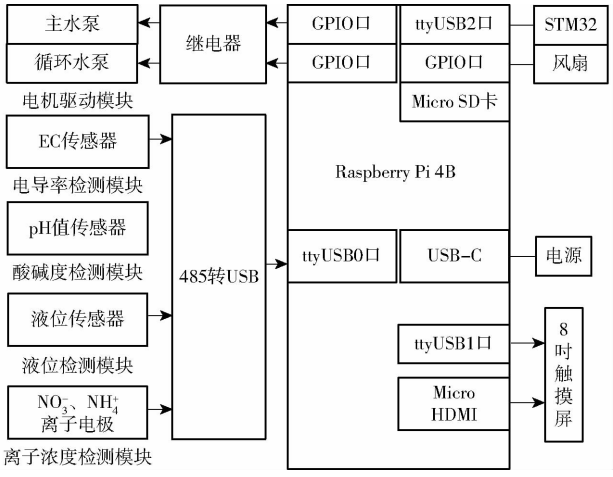


图 7　监测及决策节点结构框图

Fig. 7　Monitoring and decision node structure block diagram

2.2　系统软件设计

系统软件设计主要包括下位机和上位机程序设计。下位机程序包含串口通信与水流量检测程序设计等；上位机程序涉及到离子活度回归模型的嵌入、补肥策略的执行和系统界面的设计，确保软件能够高效地管理水肥机硬件系统，并为用户提供友好、智能的操作界面。

2.2.1　控制节点软件设计

控制节点程序实现串口通信、PWM 调速和补液调控等功能，主要由主程序、串口通信、电机驱动与水流量检测等部分组成。完成程序初始化后，根据监测及决策节点传输的目标水肥量补液调控信息，将 PWM 开度设置为 100% 以启动电机执行补液操作。同时，读取 YF－S401 型水流量传感器数据，启用全局中断使能以获取实时调控水肥总量。在获取实时水肥总量后，通过比较实时水肥量与目标调控量，动态调控 PWM 开度，调整微型水泵水流量。控制节点流程图如图 8 所示。

2.2.2　监测及决策节点软件设计

监测及决策节点程序实现离子活度回归模型的嵌入、补肥策略执行和人机交互界面展示等功能。基于 Python 语言实现离子活度回归模型移植后，在智能模式下，传感器子系统将采集的 EC、pH 值、离子浓度和液位数据传输至监测及决策节点，监测及决策节点根据采集的数据，调用离子活度回归模型

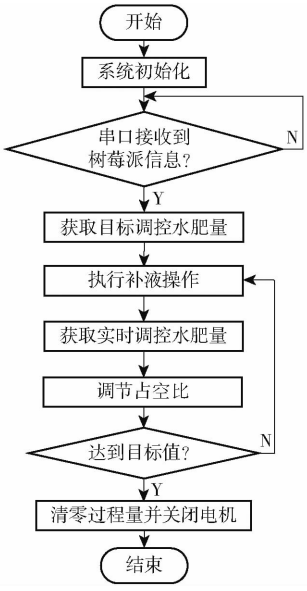


图 8 控制节点主程序流程图

Fig. 8 Control node main program flowchart

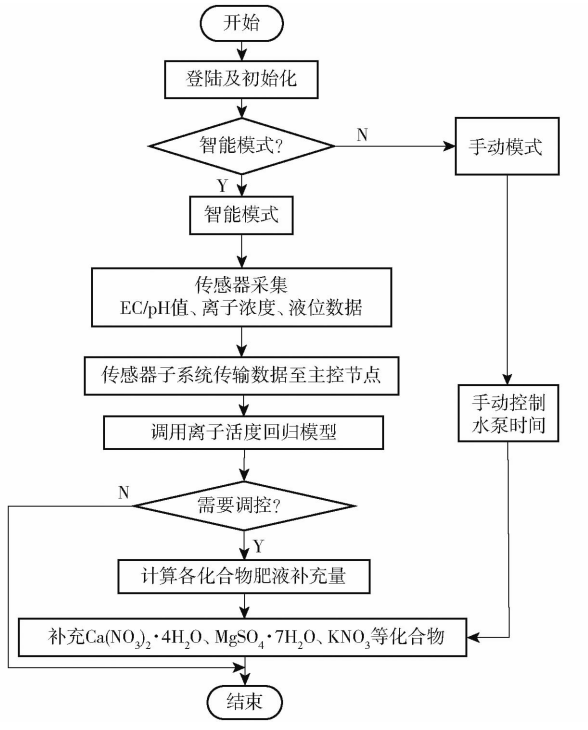
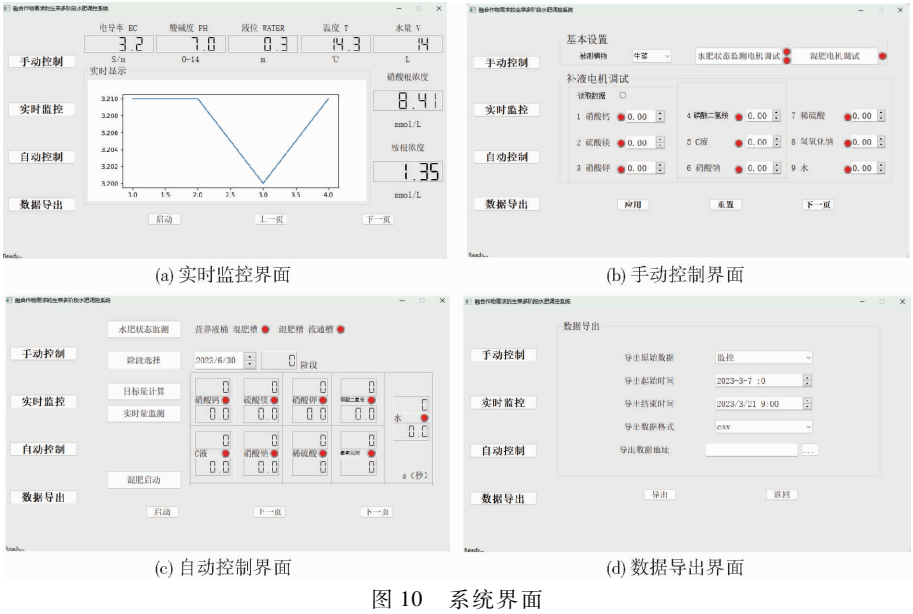


图 9 监测及决策节点流程图

Fig. 9 Monitoring and decision node flowchart

计算出实际离子浓度,并与目标浓度进行比较,如需调控,则计算各化合物的肥液补充量,进行补液操作。在手动模式下,用户可手动控制水泵时间。监测及决策节点流程如图 9 所示。

监测及决策节点程序使用 Qt - designer 和 PyQt5 软件设计可视化图形界面,实现人机交互及数据检测、显示、存储等功能。系统界面如图 10 所示。主界面包括手动控制、实时监控、自动控制和数据导出模块。手动控制模块用于进行水肥状态监测电机、混肥电机及补液电机的调试和手动设置;实时监控模块用于显示监测的水肥状态,可实现同时监控营养液的 EC、pH 值、离子浓度及其他相关参数;自动控制模块用于显示调控目标量及实时监控量,可以实现水肥状态自动监测、阶段自动选择和目标量计算,并将调控信息传递给 STM32F103 执行模块进行混肥补液操作等;最后,通过数据导出模块导出数据。



(a) 实时监控界面 (b) 手动控制界面

(c) 自动控制界面 (d) 数据导出界面

图 10 系统界面

Fig. 10 System interface

3 系统验证

3.1 模型精度验证

为验证本文模型精度,基于化学分析法将本离子活度回归模型获取结果与实际流动分析仪测量离子浓度进行对比。在本监控平台(图 11)下进行试验,采用园试通用配方溶液培养生菜,每隔 5 d 进行补液操作,在生菜生长时期多次取样送检,同时进行



图 11　水肥机设备系统组装图

Fig. 11　Assembly diagram of water fertilizer machine equipment system

营养液多组分的在线检测，包括电导率（EC）、酸碱度（pH 值）、硝态氮（NO_3^-）和铵态氮（NH_4^+）离子浓度，基于离子活度回归模型获取钙离子（Ca^{2+}）、镁离子（Mg^{2+}）和钾离子（K^+）浓度。每日随机取样 2 次，共计 20 d，累计获取 40 组数据。模型精度对比结果如图 12 所示。

从图 12 可以看出，基于 Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^+ 离子活度回归模型预测值与真实值拟合结果的拟合方程斜率分别为 0.980、0.958、0.974，接近于 1，满足预测及后续调控要求。

3.2　霍尔流量传感器调试试验

对霍尔流量传感器进行调试以及校准，以获取精准的营养液流速。用量筒分别准备 50、100、200 mL 营养液，在 PWM 占空比设置为 100% 的情况下，使用计时秒表记录蠕动泵抽取营养液所需的总时间，以总时间和定量营养液数据计算实际流速。

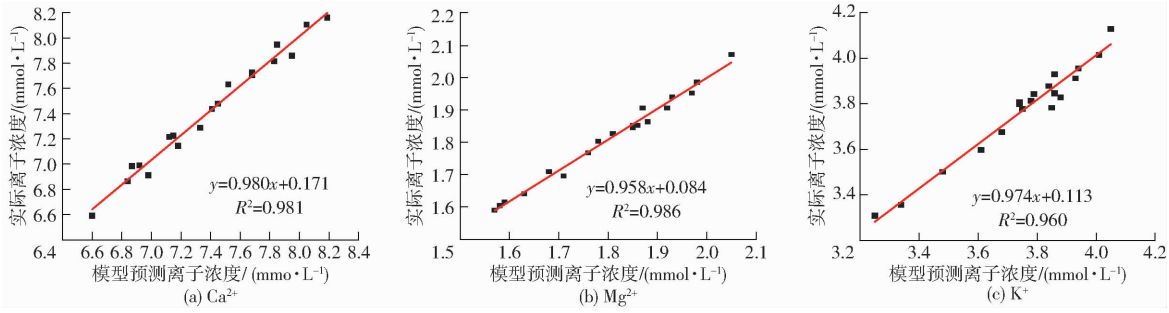


图 12　模型精度对比结果

Fig. 12　Comparison results of model accuracy

同时，记录霍尔流量传感器的反馈读数并对数据进行分析，进而计算霍尔流量传感器反馈读数与实际流量之间的误差倍数，从而确定流量计算公式的调整系数。根据结果调整和优化传感器，并进行多次（共计 9 次）测试验证。试验结果如表 3 所示。

表 3　定量营养液下霍尔流量传感器调试数据

Tab. 3　Debugging data of hall flow sensor under quantitative nutrient solution

工作电压/V	抽取总量/mL	抽取总时间/s	实际流速/(mL·min⁻¹)	霍尔流量传感器反馈读数/(mL·min⁻¹)	误差倍数
12.10	50	32	93.75	78.07	1.20
12.08	50	32	93.75	74.56	1.26
12.08	50	33	90.91	75.76	1.20
11.78	100	67	89.55	74.63	1.20
11.86	100	64	93.75	76.84	1.22
12.02	100	64	93.75	72.12	1.30
12.08	200	133	90.23	71.61	1.26
12.06	200	132	90.91	71.58	1.27
12.09	200	133	90.23	73.36	1.23

从表 3 可以看出，多次测试误差倍数为 1.20 ~ 1.30。因此，调整系数采用误差倍数平均值，为 1.25。随后以此调整系数进行了多次验证试验，满足设计需求。

在此基础上，确定 PWM 占空比与肥速之间的关系。根据实际硬件性能，设置 PWM 占空比增量为 5%。由于蠕动泵在 PWM 占空比小于 50% 时，功率低且补充营养液效率较慢，故补液时仅使用 PWM 占空比在 50% ~ 100% 之间的肥速，试验结果如表 4 所示。

3.3　基于离子活度的调控策略验证

在生菜全生长阶段验证了本研究提出的基于离子活度的调控策略，多阶段补液调控操作如图 13 所示。

从图 13 可以看出，生菜对各元素的吸收存在阶段差异。整体来看，生菜作为喜氮作物，对钙、钾需求也很大[23-24]。在生长初期，对各元素的需求量均较小，定植后 0 ~ 10 d 养分吸收量少，吸收速率也较低，均为补液后第 5 天执行调控指令；随着生菜生长，植株对氮磷钾的吸收量明显增加，且钾的吸收量高于氮、磷，这与文献[25]的研究结论一致；定植后 10 ~ 30 d 养分吸收量增加，吸收速率也迅速增加，依

表 4 不同 PWM 占空比下的施肥速度与时间

Tab. 4 Fertilizer speedometer under different PWM duty cycles

PWM 占空比/%	平均电压/V	平均施肥速度/(mL·min^{-1})	施肥时间/s
50	4.23	39.64	303
55	4.91	43.77	274
60	5.62	48.18	249
65	6.32	53.36	225
70	7.01	58.09	206
75	7.68	63.21	190
80	8.39	69.57	172
85	9.09	74.36	161
90	10.03	81.52	147
95	11.21	88.08	136
100	12.07	93.75	128

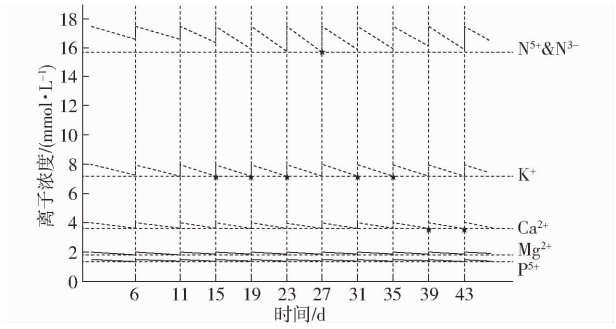


图 13 基于园试通用配方的多阶段补液调控操作

Fig. 13 Multi stage liquid replenishment control operation diagram based on universal formula of horticultural experiment

据吸收量明显增加的钾、氮元素进行调控;随着生菜生长期推进,至收获期养分总吸收量虽然增加,但吸收速率显著下降,依据相对吸收速率最快的钙元素进行调控[26]。

4 结论

(1)探究了离子活度和 EC 的关系。通过引入离子活度和 EC 贡献率的概念,研究了营养液组分的变化规律,发现离子活度对营养液 EC 的影响具有可叠加性以及离子 EC 贡献率具有相对稳定的特性,这为建立主要离子活度回归模型提供依据,进而实现了对其他主要离子浓度的估计。其方法具有普适性,但由于不同植物种类和个体吸收规律存在差异,且不同配方的离子种类和 EC 贡献率不同,需要提前进行标定,并构建模型。

(2)设计了一种基于树莓派的水肥机。提供了一种融合营养液多组分在线监测和多通道肥液补充的新型水路设计架构。验证试验结果表明,本研究提出的基于离子活度的营养液调控系统能够将固定配方的营养液 EC 控制水平提高到离子浓度控制水平,为满足作物生产对营养液离子浓度的动态需求提供理论依据。同时,采用树莓派为决策核心,能根据不同生产目标嵌入相应调控模型,拓宽水肥机应用场景及适用范围,为灌溉策略升级提供硬件基础支持。

参 考 文 献

[1] 秦琳琳, 孙德敏, 王永, 等. 无土栽培营养液循环控制系统 [J]. 农业工程学报, 2003, 19(4): 264 – 266.
QIN Linlin, SUN Demin, WANG Yong, et al. Control system of circulating nutrient solution system in soilless culture[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(4): 264 – 266. (in Chinese)

[2] 袁洪波, 李莉, 王俊衡,等. 温室水肥一体化营养液调控装备设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(8): 27 – 32.
YUAN Hongbo, LI Li, WANG Junheng, et al. Design and test of regulation and control equipment for nutrient solution of water and fertilizer integration in greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(8): 27 – 32. (in Chinese)

[3] 刘永华, 沈明霞, 蒋小平,等. 水肥一体化灌溉施肥机吸肥器结构优化与性能试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 76 – 81.
LIU Yonghua, SHEN Mingxia, JIANG Xiaoping, et al. Structure optimization of suction device and performance test of integrated water and fertilizer fertigation machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 76 – 81. (in Chinese)

[4] 李友丽,李银坤,郭文忠,等. 有机栽培水肥一体化系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 273 – 279.
LI Youli, LI Yinkun, GUO Wenzhong, et al. Design and test of integrated water and fertilizer system in organic cultivation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 273 – 279. (in Chinese)

[5] 赵燕东, 高宇, 施伟,等. 基于马利奥特装置的无土栽培营养液管理控制系统研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(6): 380 – 387.
ZHAO Yandong, GAO Yu, SHI Wei, et al. Study of nutrient solution management system based on mariotte device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6): 380 – 387. (in Chinese)

[6] FRANCESCO M, ANGELO P, PIETRO S. Closed cycle subirrigation with low concentration nutrient solution can be used for soilless tomato production in saline conditions[J]. Scientia Horticulturae, 2010, 124(3): 338 – 344.

[7] 姜娜. 在线水溶液电导率测量仪的设计与实现[D]. 大连:大连理工大学,2007.
JIANG Na. Design and realization of online measurement instrument of electrical conductivity[D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2007. (in Chinese)

[8] DIEGO S, HIDEAKI W, CARLOS A P, et al. Automated system developed to control pH and concentration of nutrient solution

evaluated in hydroponic lettuce production[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 84: 53 – 61.

[9] MARGARET A, JACKIE B LI, PETER M A, et al. Effects of nutrient solution electrical conductivity on the compositional and sensory characteristics of greenhouse tomato fruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2012, 74: 132 – 140.

[10] 李帅帅, 李莉, 穆永航,等. 基于 Fuzzy – Smith 控制器的营养液 pH 值调控系统研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(增刊): 347393.
LI Shuaishuai, LI Li, MU Yonghang, et al. pH value control system of nutrient solution based on Fuzzy – Smith controller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 347 – 393. (in Chinese)

[11] 廖晋瑞. 基于光谱信息融合的设施栽培营养液浓度快速检测系统研发[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2022.
LIAO Jinrui. A rapid detection system for nutrient solution concentration in facility cultivation based on spectral information fusion[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2022. (in Chinese)

[12] 席新明, ZHANG Naiqian, 何东健. 基于介电特性的水中钾盐浓度检测[J]. 农业工程学报, 2012, 28(7): 124 – 129.
XI Xinming, ZHANG Naiqian, HE Dongjian. Detection of sylvine concentration in water based on permittivity[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(7): 124 – 129. (in Chinese)

[13] 郭文川, 王婧, 刘驰. 基于介电特性的薏米含水率检测方法[J]. 农业机械学报, 2012, 43(3): 113 – 117.
GUO Wenchuan, WANG Jing, LIU Chi. Predicating moisture content of pearl barley based on dielectric properties[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(3): 113 – 117. (in Chinese)

[14] KIM Hak-Jin, KIM Dong-Wook, KIM Won Kyung, et al. PVC membrane-based portable ion analyzer for hydroponic and water monitoring[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 140: 374 – 385.

[15] MOHAMED K A EL-R, MAMDOUH R R, AMR M M, et al. Design of a stable solid-contact ion-selective electrode based on polyaniline nanoparticles as ion-to-electron transducer for application in process analytical technology as a real-time analyzer [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2015, 208: 14 – 21.

[16] 李俐, 王荻, 潘彩霞,等. 基于神经网络与决策树的土壤粗糙度测量[J]. 农业工程学报, 2015, 31(14): 132 – 138.
LI Li, WANG Di, PAN Caixia, et al. Soil surface roughness measuring method based on neural network and decision tree[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(14): 132 – 138. (in Chinese)

[17] 崔永杰,王明辉,张鑫宇,等. 基于支持向量机回归的营养液调控模型研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(1): 312 – 323.
CUI Yongjie, WANG Minghui, ZHANG Xinyu, et al. Regulation model research of nutrient solution based on support vector machine regression[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 312 – 323. (in Chinese)

[18] SUN Li, LEI Qun, PENG Baoliang, et al. An analysis of the parameters in the Debye-Hückel theory[J]. Fluid Phase Equilibria, 2022, 556: 113398.

[19] SONG Jinxiu, XU Lin, HE Dongxian, et al. Estimating EC and ionic EC contribution percentage of nutrient solution based on ionic activity[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering,2019,12(2): 42 – 48.

[20] 宋金修. 营养液离子动态调控技术的研究[D]. 北京:中国农业大学,2020.
SONG Jinxiu. Research on dynamic lonic control of nutrient solution[D]. Beijing: China Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[21] 骆洪义,李志红,贾国燏,等. 水肥一体化条件下生菜养分吸收特性研究[J]. 山东农业科学, 2022,54(6): 99 – 103.
LUO Hongyi, LI Zhihong, JIA Guoyu, et al. Nutrient absorption law of lettuce under integration of water and fertilizer[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2022, 54(6): 99 – 103. (in Chinese)

[22] 胡瑾,孙章彤,冯盼,等. 基于 GA – SVR 的热源自适应茎流检测与调控系统研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(7): 290 – 299.
HU Jin, SUN Zhangtong, FENG Pan, et al. Study of heat source adaptive stemflow detection system based on GA – SVR[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 290 – 299. (in Chinese)

[23] KUDIRKA G, VIRSILE A, SUTULIENE R, et al. Precise management of hydroponic nutrient solution ph: the effects of minor pH changes and mes buffer molarity on lettuce physiological properties[J]. Horticulturae, 2023, 9(7): 837 – 850.

[24] MOREIRA M A, FONTES P C R, DE CAMARGOS M I. Zinc and phosphorus interaction in nutrient solution affecting lettuce growth and yield[J]. Pesquisa Agropecuaria Brasileira, 2001,36(6): 903 – 909.

[25] INTHICHACK P, NISHIMURA Y, FUKUMOTO Y. Effect of potassium sources and rates on plant growth, mineral absorption, and the incidence of tip burn in cabbage, celery, and lettuce[J]. Horticulture, Environment, and Biotechnology, 2012, 53(2): 135 – 142.

[26] YANG Q, LU N, WANG L, et al. Exogenous spermidine promoted Ca^{2+} absorption in lettuce roots and reduced the incidence of tipburn[J]. Horticultural Science & Technology, 2018, 36(5): 702 – 712.