

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.01.035

基于支持向量机回归的营养液调控模型研究

崔永杰^{1,2} 王明辉¹ 张鑫宇¹ 宁普才¹ 崔功佩^{1,3} 王琦⁴

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 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. 陕西省农业信息感知与智能服务重点实验室, 陕西杨凌 712100; 4. 陕西旭田光电农业科技有限公司, 陕西杨凌 712100)

摘要: 针对目前设施栽培中营养液动态调配精确度低的问题, 提出一种基于支持向量机回归 (Support vector machine regression, SVR) 的营养液调控模型。首先, 通过设计嵌套试验采集了 13 个温度、50 组不同 Knop 营养液 (A:99% $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, B:98% KNO_3 , C:99% KH_2PO_4 , D:98% $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, E:99% EDTA - NaFe) 5 种化合物) 配比下的营养液 pH 值、EC、 K^+ 质量浓度、 Ca^{2+} 质量浓度和 NO_3^- 质量浓度等检测指标值, 并基于 SVR 构建营养液检测指标预测模型; 然后, 采用离散斜率法计算营养液检测指标值与 5 种化合物含量的响应曲线离散斜率, 并利用人工鱼群算法获取离散斜率最大突变点; 最后, 以该突变点对应的 5 种化合物含量作为最优调控目标值, 基于 SVR 构建营养液调控模型, 并进行验证试验。结果表明: 基于 SVR 的营养液调控模型中对应 5 种化合物含量的决定系数分别为 0.99、0.98、0.99、0.96、0.99, 均方根误差分别为 4.29、7.39、5.02、2.85、3.96 mg, 拟合效果良好。对比逐步拟合响应模型获取目标值的结果发现, 基于 SVR 的营养液调控模型 5 种化合物含量的平均相对误差分别降低了 37.65%、49.94%、40.53%、50.58%、42.84%; 在验证试验中, 对比逐步拟合响应模型发现, 基于 SVR 的营养液调控模型 5 种化合物使用量的相对误差平均值分别降低了 46.42%、52.08%、54.03%、53.59%、54.54%, 调控过程中 5 种化合物使用量的平均降低率分别为 1.69%、5.81%、5.85%、3.65%、7.08%。本文基于 SVR 构建的营养液调控模型具有高效、节能特点, 可为设施作物栽培的实际生产应用提供参考。

关键词: 营养液; 调控模型; 支持向量机回归; 离散斜率; 人工鱼群算法

中图分类号: S365

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2021)01-0312-12

OSID:



Regulation Model Research of Nutrient Solution Based on Support Vector Machine Regression

CUI Yongjie^{1,2} WANG Minghui¹ ZHANG Xinyu¹ NING Pucan¹ CUI Gongpei^{1,3} WANG Qi⁴

(1. College of Mechanical and Electronic 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. Shaanxi Key Laboratory of Agricultural Information Perception and Intelligent Service, Yangling, Shaanxi 712100, China

4. Shaanxi Xutian Photoelectric Agricultural Technology Co., Ltd., Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Aiming to struggle with the problem of low precision of nutrient solution dynamic deployment in protected cultivation. Based on support vector machine regression (SVR), a model for regulating nutrient solution was established. Firstly, the pH value, EC, K^+ concentration, Ca^{2+} concentration and NO_3^- concentration of nutrient solution were collected under 13 temperatures and 50 groups of Knop nutrient solution ratio (A:99% $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, B:98% KNO_3 , C:99% KH_2PO_4 , D:98% $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, E:99% EDTA - NaFe), and SVR was used to construct the index value prediction model. Then, the discrete slope method was used to calculate the discrete slope of the content response curve for nutrient solution detection index value and five compounds, and artificial fish swarm algorithm was used to obtain the maximum mutation point of discrete slope. Finally, the optimal regulation model of nutrient solution was constructed based on SVR with the amount of five compounds corresponding to the largest mutation feature site as the optimal control target value. The determination coefficients of the five compounds in the nutrient solution regulation model were 0.99, 0.98, 0.99, 0.96 and 0.99; the root mean square errors were 4.29 mg, 7.39 mg, 5.02 mg, 2.85 mg and 3.96 mg. These results showed that the fitting effect was

收稿日期: 2020-09-25 修回日期: 2020-11-12

基金项目: 杨凌示范区产学研用协同创新重大项目(2018CXY-22)和陕西省重点研发计划项目(2019ZDLNY02-04)

作者简介: 崔永杰(1971—),男,教授,博士生导师,主要从事果蔬生产自动化研究, E-mail: cuiyongjie@nwfu.edu.cn

good. Compared with the control effect of stepwise regression method to obtain the target value, the average relative errors of the five compounds were reduced by 37.65%, 49.94%, 40.53%, 50.58% and 42.84%. In the validation test, compared with the stepwise regression method, the relative average errors of five compounds in the nutrient solution regulation model was reduced by 46.42%, 52.08%, 54.03%, 53.59% and 54.54%. The average reduction rates of the five compounds were 1.69%, 5.81%, 5.85%, 3.65% and 7.08%, respectively. The nutrient solution regulation model based on SVR had the characteristics of high efficiency and energy saving, which may provide a reference for the practical production and application of protected crop cultivation.

Key words: nutrient solution; regulation model; support vector machine regression; discrete slope; artificial fish swarm algorithm

0 引言

营养液为设施栽培作物提供所需的营养物质,对作物生长发育和物质积累至关重要^[1],营养液浓度不足或过高都会对作物生长产生有害影响^[2-6]。同时,温度变化易使营养液检测指标值发生改变^[7-9]。因此,研究适宜温室设施栽培的营养液各化合物含量与检测指标值之间的关系、构建营养液调控模型,已成为设施栽培中营养液环境高效调控亟待解决的问题。

近年来,营养液调控方法的研究主要集中于栽培配方^[10-11]、控制模型^[12-13]和元素特性^[14-15]等方面,对营养液调控模型的研究较少。文献[8]通过温室试验研究量化了不同株龄生菜对 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 H_2PO_4^- 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 的日吸收规律,建立了生长速率、吸收速率和株龄间的关系。文献[16]建立了营养液投放周期模型,将作物栽培划分成定植前和定植后 2 个生长阶段,在此基础上建立 2 个阶段的数学模型,实现了水培作物所需营养液的分时、分阶段投放。文献[17]基于多路单一营养液的混合施用模式,提出一种动态二次混肥特性的混合方式,根据文丘里基本原理建立了营养液调控动态模型。以上研究针对施用过程中营养液动态混合特性模型和作物的影响规律模型而展开,且仅考虑了营养液中不同化合物加入量对 EC/pH 值的影响。然而,温度等因素也会对营养液调控的限制点产生动态影响。

营养液调控模型的研究主要集中在水肥耦合模型、养分添加模型等方面,文献[18]通过试验确定不同母液加入量与营养液 EC/pH 值之间的关系,建立了基于 EC/pH 值的营养液各母液量调控模型。文献[19]基于多指标协同方法,通过试验确定不同水肥对草莓产量、品质和水肥利用效率等指标的影响,进而建立了草莓水肥耦合调控模型。文献[20]基于 Na^+ 浓度、 Cl^- 浓度与营养液目标总浓度关系,建立了闭式营养液循环系统中营养液总浓度调控模

型。上述研究虽然在一定程度上提升了设施栽培营养液的供应效果,但难以实现营养液的高效精准调控。温度、pH 值、EC 以及 K^+ 、 Ca^{2+} 、 NO_3^- 等离子浓度是营养液判定的主要指标,通过融合上述多因素构建耦合调控模型对提高调控精度具有重要作用。

针对上述问题,在考虑营养液检测指标值、各化合物含量与调控效益的前提下,本文基于 Knop 配方^[21]进行研究。首先,构建基于 SVR 的营养液检测指标值预测模型;然后,计算营养液检测指标值与 5 种化合物含量响应曲线的离散斜率,并利用人工鱼群算法获取斜率最大突变点;最后,以该突变点对应的 5 种化合物含量作为最优调控目标值,基于 SVR 构建营养液调控模型,以期为设施栽培中营养液的精准调控提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2020 年 5—6 月在西北农林科技大学南校区科研温室(北纬 $34^\circ 14'$ 、东经 $107^\circ 59'$,暖温带半干旱半湿润大陆季风气候)进行。本文对基于 Knop 营养液配方使用的化合物 A: $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (纯度 99%)、化合物 B: KNO_3 (纯度 98%)、化合物 C: KH_2PO_4 (纯度 99%)、化合物 D: $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (纯度 98%)、化合物 E: EDTA-NaFe(纯度 99%)展开研究。

本研究利用 RMD-HB 型数字 pH 传感器(上海蓝长自动化科技有限公司)、RMD-CF-1 型数字 EC 传感器(上海蓝长自动化科技有限公司)和 LH-1080F 型离子传感器(杭州陆恒生物科技有限公司)测定营养液温度、pH 值、EC、 K^+ 质量浓度、 Ca^{2+} 质量浓度和 NO_3^- 质量浓度^[22]。对于试验数据集的获取,为降低“光照强度”对试验数据的影响,利用 PRX-2000A 型智能人工气候箱(上海乔跃公司)开展数据采集及相关试验研究工作,具体选择均匀混合营养液的中心位置进行数据采集,试验装置如图 1 所示。

在对营养液调控效果进行试验验证的过程中,

本研究使用自行研制的营养液自动调控系统进行调控试验,如图2所示。

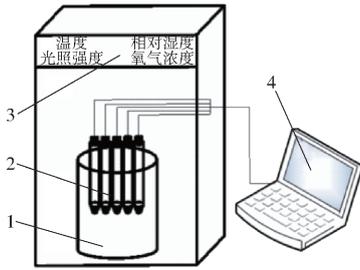


图1 数据采集试验装置

Fig.1 Data acquisition test device

1. 营养液混合物 2. 数据采集传感器 3. 人工气候箱 4. 数据采集软件/界面



图2 营养液调控系统

Fig.2 Experiment device for nutrient solution control

1. 调配桶 2. 电磁阀门 3. 化合物罐 4. 栽培槽 5. 传感器
6. 监测界面 7. 过渡桶

利用该系统的传感器对营养液的 pH 值、EC、 K^+ 质量浓度、 Ca^{2+} 质量浓度、 NO_3^- 质量浓度和温度等信息进行实时监测,并传达给决策节点。决策节点基于实时信息,利用 STM32 单片机内嵌的营养液调控模型计算调控目标值。然后,根据实时 pH 值、EC、 K^+ 质量浓度、 Ca^{2+} 质量浓度、 NO_3^- 质量浓度和调控目标值,判断是否需要调控。若当前 5 种化合物含量均处于给定阈值范围之内,则不进行调控,而是继续对调控目标值进行计算与比较;若当前存在化合物含量低于目标值,则对动态营养液 5 种化合物含量差值进行计算,同时发出营养液化合物含量调控信号。营养液搅拌机构开始工作,打开调控设备所对应待加入化合物的电磁阀,并按化合物 A、B、C、D、E 的顺序依次向待调配营养液中添加质量浓度为 500 mg/mL 的化合物浓缩液,并利用流量计监测加入浓缩液量,待所需化合物浓缩液释放量达到指标要求后关闭电磁阀,同时搅拌机构继续工作 5 min,待营养液充分混合均匀后,再返回决策节点。

1.2 试验方法

1.2.1 数据集获取

数据采集时,相对湿度设置为 70%,光照强度设置

为 $450 \text{ mol}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$,氧气质量浓度设置为 $7.5 \text{ mg}/\text{L}$ 。营养液配置期间,保持温度稳定,待营养液充分溶解(不出现悬浮颗粒物)且静置 10 min 后,在均匀混合营养液中心位置进行 pH 值、EC、 K^+ 质量浓度、 Ca^{2+} 质量浓度和 NO_3^- 质量浓度的检测。试验过程中化合物溶解与混合通过机器搅拌的方式实现,无任何其他因素介入。设施栽培作物的生长温度为 $20 \sim 25^\circ\text{C}$ [23],使用人工气候箱设定 $16 \sim 28^\circ\text{C}$ (间隔 1°C) 13 个温度梯度试验条件。利用响应曲面法设计 5 种不同含量化合物随机组合的试验共 50 组,且每组试验重复 3 次,剔除错误数据后取平均值作为试验结果,共获取 650 组有效试验数据。

1.2.2 多因素交互的营养液检测指标值预测模型

利用 SVR 算法 [24] 构建营养液检测指标值预测模型,同时使用 BP (Back propagation) 神经网络和极限学习机 (Extreme learning machine, ELM) 在 Matlab R2018b 环境下构建拟合预测模型。按 4:1 的比例将试验所得的 650 组有效数据随机分为训练集和测试集,即:选取 520 组数据作为训练集(占总数据集的 80%),剩下 130 组数据作为测试集(占总数据集的 20%)。以 5 种化合物含量和温度作为输入样本,分别以 pH 值、EC、 K^+ 质量浓度、 Ca^{2+} 质量浓度和 NO_3^- 质量浓度作为输出样本。采用 SVR 算法构建营养液检测指标值预测模型,进行营养液检测指标值的拟合预测,其建模流程如图 3 所示,具体如下:

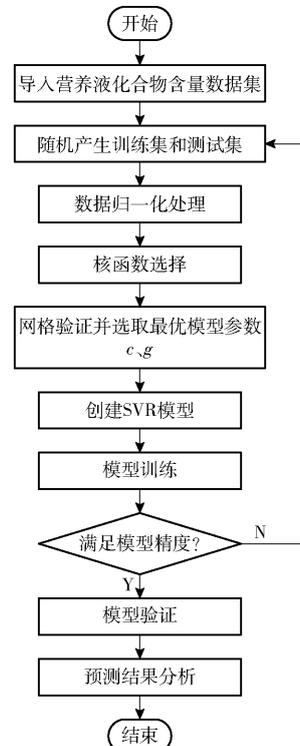


图3 支持向量机回归建模流程图

Fig.3 Flow chart of support vector regression modeling

(1) 将数据集进行归一化操作, 以避免大数据淹没小数据现象的发生, 同时便于神经网络预测与斜率计算。

(2) 确定 SVR 算法关键参数。由于径向基核函数计算的复杂度不随参数变化而变化, 故选取其作为核函数; 惩罚因子 c 和影响因子 g 为主要影响参数。经网格验证方法进行多次经验计算获取最佳参数值, 5 种检测指标值对应关键参数, c 分别为 8、10、128、128、128, g 分别为 0.03、0.04、0.05、0.05、0.05。

(3) 训练及构建模型。针对 520 组训练集, 采用径向基核函数, 通过低维空间的非线性不可分问题映射到高维空间, 并在高维空间产生用于最优分类的超平面, 进行线性回归决策分析。

1.2.3 响应曲线斜率最大突变点获取

1.2.3.1 响应曲线离散斜率计算

斜率作为常用的曲线评价指标被用于曲线特征位点的获取^[25], 在营养液检测指标值响应曲线中, 斜率最大突变点代表化合物含量与检测指标值相关性最大的特征位点, 是构建营养液调控模型的关键。且离散斜率法计算局部区域斜率不受整条曲线的全局影响^[26], 因此使用离散斜率法进行本文曲线斜率获取。离散斜率计算包含两方面内容:

首先获取营养液检测指标值响应曲线, 通过调用已建立的 SVR 算法营养液检测指标值预测模型网络, 获取不同温度下 pH 值、EC、 K^+ 质量浓度、 Ca^{2+} 质量浓度和 NO_3^- 质量浓度与 5 种化合物含量的关系。温度以 $1^\circ C$ 为步长, 建立斜率获取温度条件数据样本集 $T^i = (T^1, T^2, \dots, T^{13})$, 其中 $T^i = 16 + (i-1)$, i 取 1~13 的整数。在温度 16~28 $^\circ C$ 范围内, 完成预测模型对温度的实例化, 从而建立不同温度条件下的营养液各检测指标响应曲线。

其次进行离散斜率计算, 由于 pH 值、EC、 K^+ 质量浓度、 Ca^{2+} 质量浓度和 NO_3^- 质量浓度与 5 种化合物含量不在同一量级内, 故需进行归一化处理后再计算响应曲线的离散斜率。首先拟合当前离散点的曲线方程, 然后计算当前曲线的离散曲线斜率。曲线在 p_i 点的斜率为

$$c(x) = f'(x) \quad (1)$$

$$k_{p_i} = c(x_i) \quad (2)$$

式中 $c(x)$ ——拟合曲线斜率

$f'(x)$ ——拟合曲线方程一阶导数

k_{p_i} —— p_i 点斜率

x_i —— p_i 点横坐标值

按照以上步骤对响应曲线各点求斜率, k_{p_i} 为正表示曲线在当前点呈上升趋势, 反之表示曲线在当

前点呈下降趋势。为避免试验数据微小波动对结果产生影响, 而无法准确获取斜率最大突变点, 因此本研究将计算所得离散斜率统一取正值。

1.2.3.2 基于人工鱼群算法的斜率最大突变点获取

本文在建立营养液检测指标值预测模型的基础上, 使用基于动态调整视野和步长的人工鱼群算法^[27], 完成特定温度下营养液检测指标值斜率最大突变点的寻优。动态调整公式为

$$v = av_{i-1} + v_{\min} \quad (3)$$

$$s_i = as_{i,i-1} + s_{\min} \quad (4)$$

式中 v ——本次搜索人工鱼的视野

s_i ——本次搜索人工鱼移动的步长

v_{i-1} ——前次搜索人工鱼的视野

$s_{i,i-1}$ ——前次搜索人工鱼移动的步长

a ——调节系数

v_{\min} ——视野范围最小变化量

s_{\min} ——步长最小变化量

由式(3)、(4)可得, 在初值确定的条件下, 视野和步长由调节系数 a 决定, 且与 a 呈线性关系。因此, a 变化趋势应与视野和步长保持一致, 本文采用增加权值的方法构建调节系数, 即

$$a = (1 - t/T_{\max})^s \quad (5)$$

式中 t ——当前迭代次数

T_{\max} ——最大迭代次数

s ——变化速率, 取 $[0, 10]$ 内的整数

在对关键参数进行确定时, 变化速率 s 为 2, 鱼群规模为 100, 重复次数为 100, 拥挤度因子为 0.618, 通过上述参数设置, 以此完成对营养液检测指标值斜率最大突变点的寻优。

针对以上方法, 完成人工鱼位置更新以及对生成新鱼群的优化过程迭代, 直到完成特定温度下营养液检测指标值离散斜率最大突变点的寻优。同时记录和保存营养液检测指标值离散斜率最大突变点对应的营养液 5 种化合物含量, 直至获取所有响应曲线斜率最大突变点对应的 5 种化合物含量。

1.2.4 营养液调控模型构建

基于人工鱼群寻优方法, 将所得到的温度、pH 值、EC、 K^+ 质量浓度、 Ca^{2+} 质量浓度和 NO_3^- 质量浓度作为输入, 离散斜率最大突变点对应的营养液 5 种化合物含量作为输出, 共 618 组目标营养液各化合物含量数据集, 采用 SVR 算法进行营养液调控模型构建。针对 618 组目标营养液各化合物含量数据集, 随机选取 495 组样本数据 (约占总样本的 80%) 作为训练集, 123 组 (约占总样本的 20%) 作为测试集。选择径向基函数参与模型训练, 确定 5

种化合物含量模型最佳参数, c 分别为 1.74、5.28、48.50、48.50、128.00, g 分别为 0.06、0.06、0.01、0.01、0.01, 以此完成营养液调控模型的构建。

1.2.5 调控效果验证

在进行调控效果验证试验时,为降低非试验因素对试验效果的影响,在同一温室的 2 个尺寸相同的营养液栽培槽内进行。设定温室温度 16 ~ 28℃ (间隔 1℃) 13 个温度梯度试验条件,设置 10 组不同化合物配比且与调控目标值存在偏差的营养液进行调控试验,如表 1 所示。每组试验重复 3 次,剔除错误数据后取平均值作为试验结果。对比基于 SVR 的营养液调控模型组和逐步拟合响应模型组的调控效果。试验中运行基于 SVR 的营养液调控目标点获取模型和逐步拟合响应目标点获取模型,分别获取目标值对优化调控区和传统调控区进行调控。

2 结果与分析

2.1 营养液检测指标值预测模型验证结果

为了验证 SVR 算法构建预测模型的拟合效果,

对比 BP 神经网络和 ELM 回归构建拟合预测模型,且与目前普遍应用于作物栽培的多元线性回归模型^[18]和逐步拟合响应模型^[28]等进行对比,5 种模型评价对比如表 2 所示。

表 1 10 组不同化合物配比

Tab.1 Ratio of 10 groups of different compounds

序号	化合物质量/mg					营养液 体积/L
	A	B	C	D	E	
1	5 000	1 500	1 000	3 500	1 500	10
2	6 000	1 000	1 500	4 000	1 000	
3	6 500	1 000	1 000	4 500	1 000	
4	5 000	500	500	2 500	1 500	
5	7 000	1 000	500	2 000	500	
6	8 000	500	1 000	1 500	1 000	
7	4 500	1 500	1 500	3 000	1 500	
8	2 000	1 000	1 500	3 500	1 500	
9	8 500	500	500	4 000	1 000	
10	9 000	1 500	1 000	2 000	500	

由表 2 可见,对比其他方法,SVR 算法构建预测模型的确定系数最高,均方根误差最小。检测指标值预测模型的确定系数分别为 0.98、0.94、0.97、

表 2 5 种建模方法的预测模型评价指标对比

Tab.2 Comparison of prediction model indicators for five modeling methods

方法	决定系数					均方根误差				
	pH 值	EC	K ⁺ 质量 浓度	Ca ²⁺ 质量 浓度	NO ₃ ⁻ 质量浓度	pH 值	EC/ ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	K ⁺ 质量浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$)	Ca ²⁺ 质量浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$)	NO ₃ ⁻ 质量浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$)
BP	0.96	0.92	0.96	0.89	0.96	2.49	4.48	3.03	1.25	2.55
SVR	0.98	0.94	0.97	0.93	0.98	1.73	3.81	1.79	0.87	1.53
ELM	0.92	0.90	0.92	0.87	0.92	4.04	6.73	4.53	3.78	4.26
多元回归	0.92	0.89	0.91	0.88	0.92	4.32	7.08	5.21	3.87	4.55
逐步拟合	0.97	0.95	0.97	0.94	0.97	1.83	3.80	1.68	0.92	1.76

0.93、0.98;均方根误差分别为 1.73、3.81 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、1.79 mg/mL 、0.87 mg/mL 、1.53 mg/mL ,证明采用 SVR 算法构建预测模型是可行的。

进一步分析可知,常用模型中逐步拟合响应模型的确定系数大于多元线性回归模型,均方根误差和平均绝对误差小于多元线性回归模型,说明逐步拟合响应模型对本文试验数据的拟合效果更好。另外,通过对逐步拟合响应模型与 SVR 算法预测模型进行对比分析,可以看出,逐步拟合响应模型中 5 种检测指标值预测模型决定系数分别为 0.97、0.95、0.97、0.94、0.97;均方根误差分别为 1.83、3.80 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、1.68 mg/mL 、0.92 mg/mL 、1.76 mg/mL ,与 SVR 算法预测模型相应评价指标相近。这说明,SVR 算法预测模型的拟合效果与逐步拟合响应模型的拟合效果相似。但逐步拟合响应模型简化了拟合过程中的复杂数据,而 SVR 算法预测模型则是通过将全部数据进行回归

拟合所得到,其预测结果更加准确;另外,逐步拟合响应模型无法预测实测点之外的数据,而 SVR 算法预测模型可在保证与逐步拟合响应模型相近精度的情况下对非试验条件样本的预测,从而有效解决试验样本不足这一问题。

本研究通过异校验方式凭借验证集对营养液检测指标值预测模型的泛化能力进行验证,得到营养液 5 种检测指标实测值和预测值相关性如图 4 所示。图中直线 L_{11} 、 L_{21} 、 L_{31} 、 L_{41} 、 L_{51} 分别为 5 种检测指标验证集数据实际值和预测值的拟合直线。其中 L_{11} 斜率为 0.99,截距为 0.05; L_{21} 斜率为 1,截距为 3.63; L_{31} 斜率为 0.98,截距为 0.01; L_{41} 斜率为 0.98,截距为 0.02; L_{51} 斜率为 1,截距为 0.005 88,由拟合直线的斜率和截距可明显看出,营养液 5 种检测指标值验证数据集预测值与实测值的相关性较高。

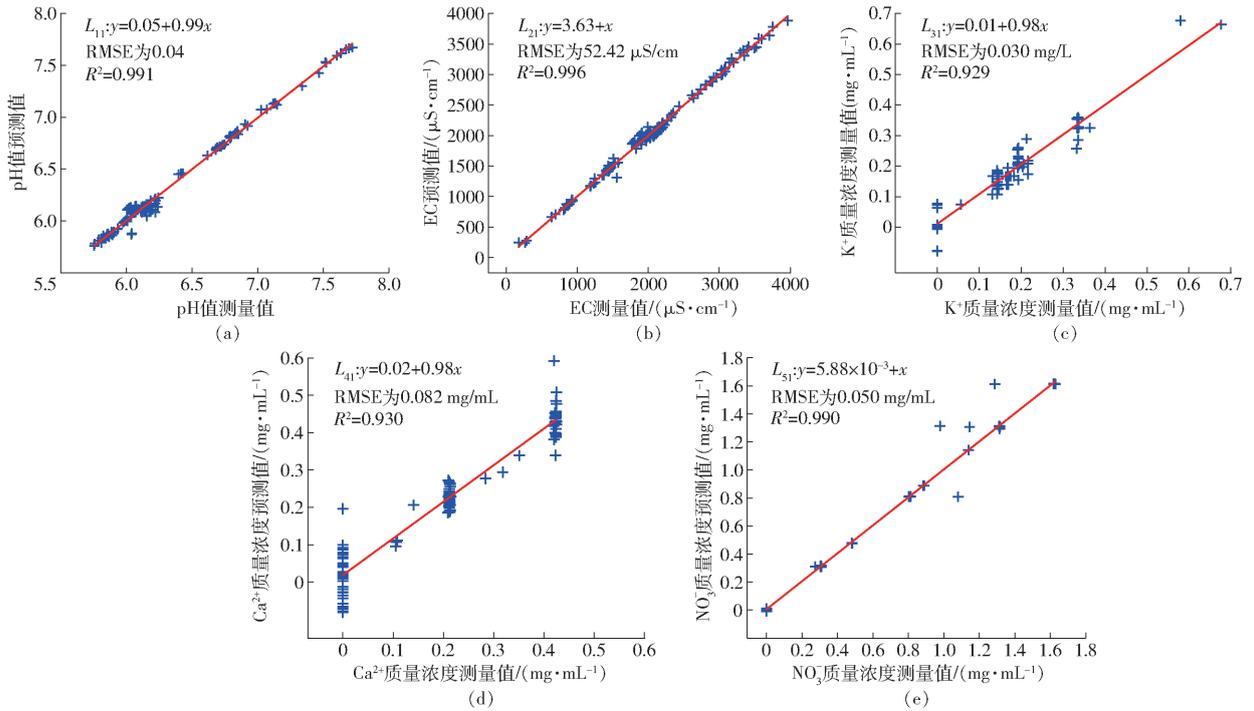


图 4 基于 SVR 的营养液检测指标值预测模型验证

Fig. 4 Validation prediction model of detection index value based on SVR

2.2 离散曲线斜率最大突变点获取结果

在建模过程中累计获得 618 组不同条件下的曲线斜率突变点, 由于不易被全部罗列, 下文仅展示温度在 16 ~ 28°C 范围内, 以 6°C 为步长的营养液检测指标值响应曲线斜率及斜率最大突变点的获取结果, 如图 5 所示, 图中 $K(\text{pH 值})$ 、 $K(\text{EC})$ 、 $K(\text{K}^+)$ 、 $K(\text{Ca}^{2+})$ 、 $K(\text{NO}_3^-)$ 分别表示 pH 值、EC、 K^+ 质量浓度、 Ca^{2+} 质量浓度、 NO_3^- 质量浓度的斜率。同时为了对比斜率最大突变点与营养液 5 种化合物含量的关系, 从本研所得到的试验结果中提取营养液 5 种化合物的最佳含量值, 并将营养液 5 种化合物的最佳含量值与营养液检测指标值响应曲线中斜率最大突变点相结合考虑, 并绘制其对比关系图, 最后得到营养液检测指标值响应曲线中斜率最大突变点和营养液最佳含量的对比关系图, 如图 6 所示。图 5a、5b、5c、6a、6b、6c 中化合物 B、C、D、E 的加入量分别为 100、100、200、100 mg; 图 5d、5e、5f、6d、6e、6f 中化合物 A、C、D、E 的加入量分别为 500、100、200、100 mg; 图 5g、5h、5i、6g、6h、6i 中化合物 A、B、D、E 的加入量分别为 500、100、200、100 mg; 图 5j、5k、5l、6j、6k、6l 中化合物 A、B、C、E 的加入量分别为 500、100、100、100 mg; 图 5m、5n、5o、6m、6n、6o 中化合物 A、B、C、D 的加入量分别为 500、100、100、200 mg。

由图 5、6 可以发现, 定义离散曲线斜率图中斜率最大突变点值代表营养液 5 种化合物含量与检测指标值对应的特征位点, 表征营养液检测指标值响

应曲线所对应的检测指标值, 说明离散曲线斜率法可以提供准确的营养液 5 种化合物含量调控目标点。由营养液检测指标图可以发现, 随着化合物含量的增加, pH 值呈下降趋势, EC、 K^+ 质量浓度、 Ca^{2+} 质量浓度和 NO_3^- 质量浓度呈上升趋势; 所有特征位点对应的营养液 5 种化合物含量均稍微大于理论值, 且营养液检测指标值基本保持不变, 说明使用该特征位点对应的 5 种化合物含量作为目标值进行营养液调控, 可以在保证调控效果的情况下减少 5 种化合物的使用量。

进一步分析发现, 随着温度的增加, pH 值特征位点和理论点呈下降趋势, EC 特征位点和理论点呈上升趋势, K^+ 质量浓度、 Ca^{2+} 质量浓度和 NO_3^- 质量浓度特征位点基本无变化。以上分析说明了不同温度下营养液 5 种化合物含量斜率特征位点和理论点均存在差异。

2.3 营养液各化合物优化调控模型验证结果

为验证基于 SVR 的营养液调控模型的拟合效果, 本文同时采用 BP 神经网络和 SLM 拟合 2 种方法构建调控模型, 模型评价对比如表 3 所示。由表 3 可见, 基于 SVR 的营养液调控模型中对应 5 种化合物含量的决定系数分别为 0.99、0.98、0.99、0.96、0.99; 均方根误差分别为 4.29、7.39、5.02、2.85、3.96 mg。相较于 BP 神经网络和 SLM 拟合 2 种方法而言, 基于 SVR 的营养液调控模型决定系数最高, 均方根误差最低, 所构建的营养液调控模型具有更高的精确度和拟合效果。

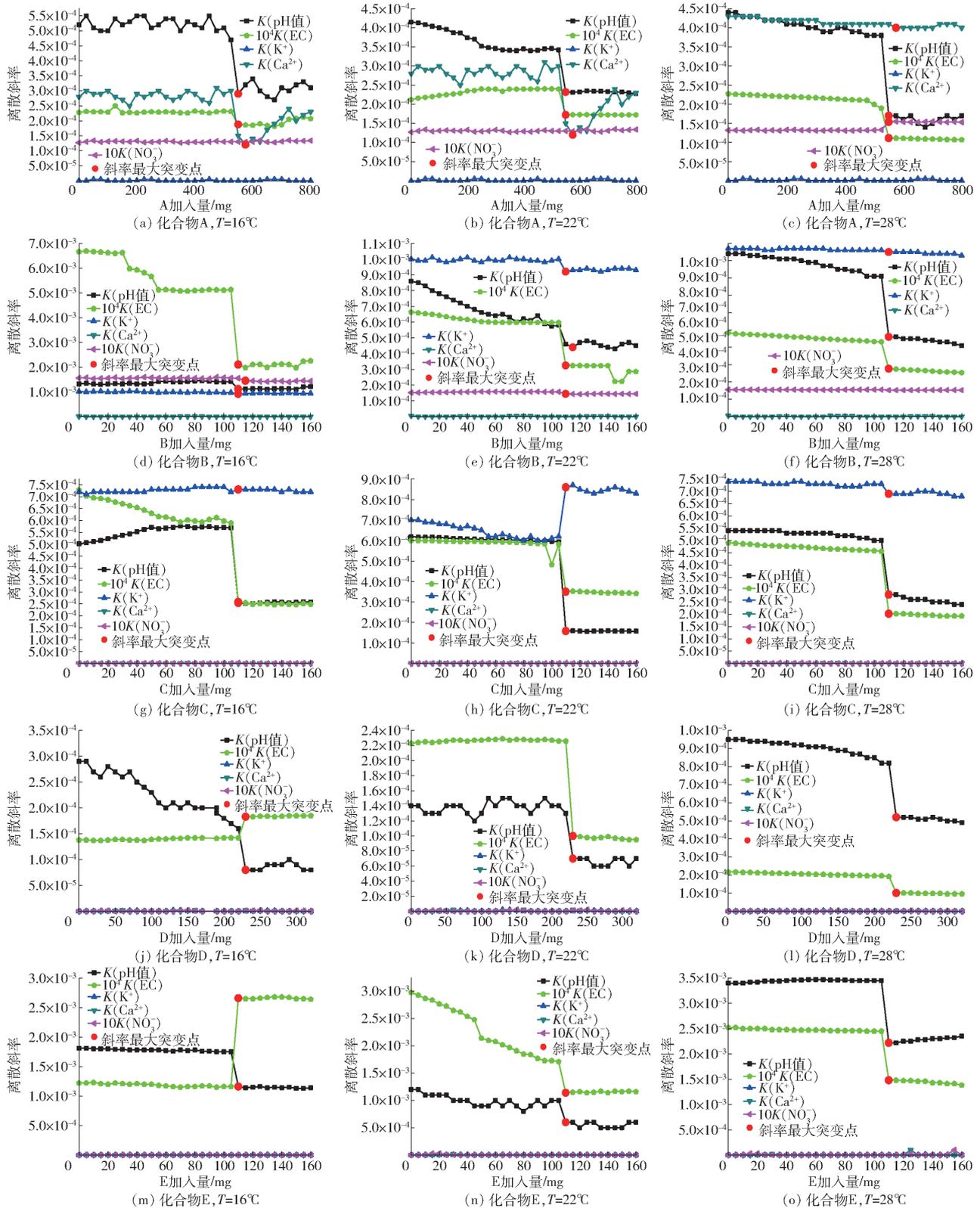


图5 营养液检测指标响应曲线离散斜率特征点获取结果

Fig. 5 Obtaining characteristic points of discrete slope of response curve of nutrient solution

为进一步证明基于SVR的营养液调控模型的准确性,本研究采用相同试验材料测量了60组不同温度、5种化合物含量组合条件下对应的pH值、EC、 K^+ 质量浓度、 Ca^{2+} 质量浓度和 NO_3^- 质量浓度,分别记录5种化合物含量,以此作为调控的目标实

测值。同时,将基于SVR的营养液调控模型获取结果作为调控的目标预测值,进行调控模型验证,相关性如图7所示。图中直线 L_{12} 、 L_{22} 、 L_{32} 、 L_{42} 、 L_{52} 分别为5种化合物含量实际值和预测值的拟合直线。其中 L_{12} 斜率为1.00,截距为1.15; L_{22} 斜率为0.99,截

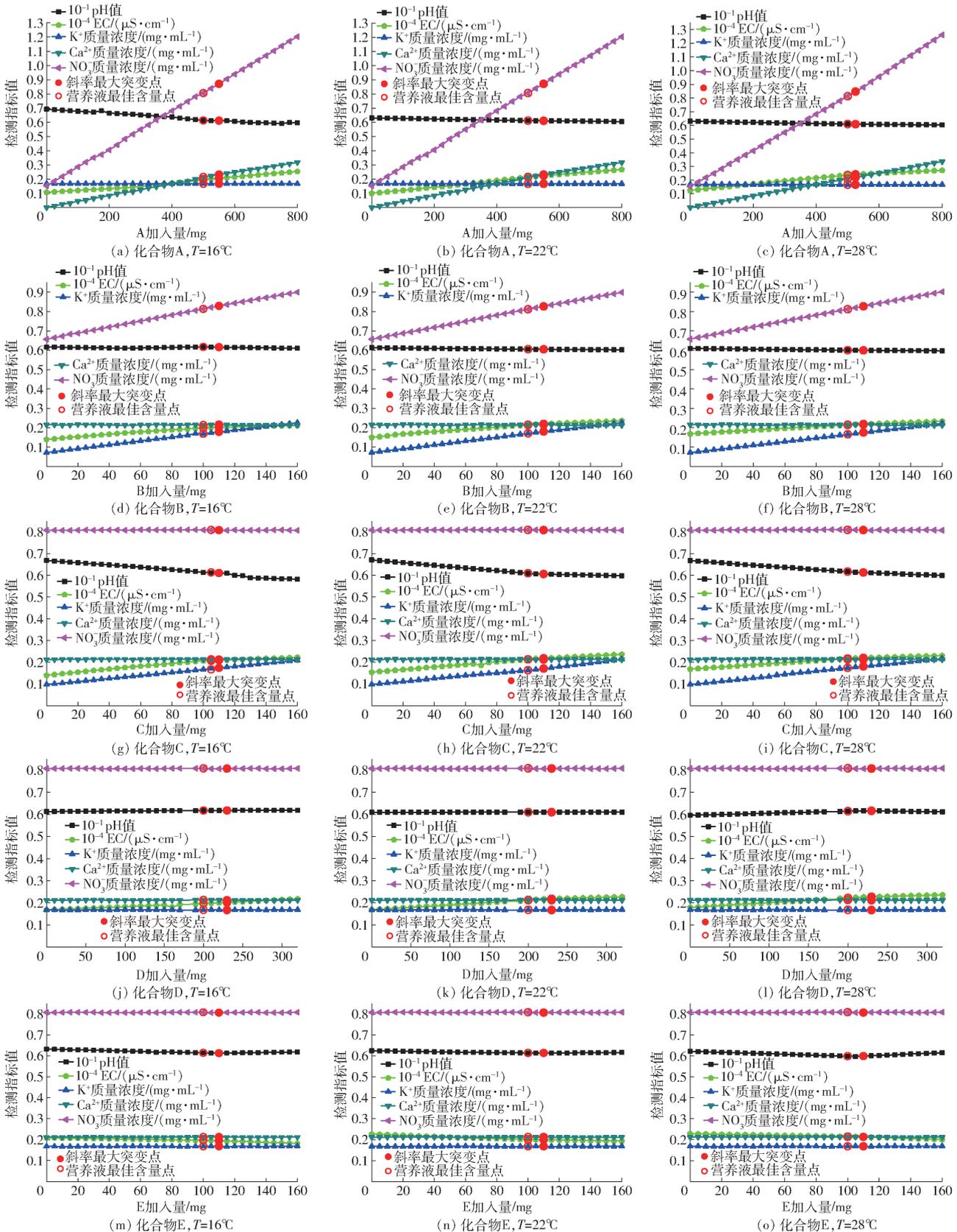


图 6 营养液检测指标响应曲线特征点获取与效果对比

Fig. 6 Characteristic points acquisition of response curve of nutrient solution

距为 1.67; L_{32} 斜率为 0.99, 截距为 1.31; L_{42} 斜率为 0.99, 截距为 6.9; L_{52} 斜率为 0.99, 截距为 1.46。可见, 基于 SVR 的营养液调控模型能够准确预测营养液 5 种化合物含量的效益优化点, 为营养液的精准

调控提供了定量依据。

2.4 调控效果对比

2.4.1 理论调控效果分析

为了进一步验证基于 SVR 的营养液调控模型

表3 3种建模方法的调控模型评价指标对比

Tab. 3 Comparison of evaluation indexes of regulation model for three modeling methods

算法	决定系数					均方根误差/mg				
	化合物 A	化合物 B	化合物 C	化合物 D	化合物 E	化合物 A	化合物 B	化合物 C	化合物 D	化合物 E
BP	0.97	0.96	0.98	0.91	0.98	5.42	7.60	5.73	3.73	5.16
SVR	0.99	0.98	0.99	0.96	0.99	4.29	7.39	5.02	2.85	3.96
ELM	0.96	0.94	0.97	0.91	0.96	8.43	10.36	9.35	6.97	8.21

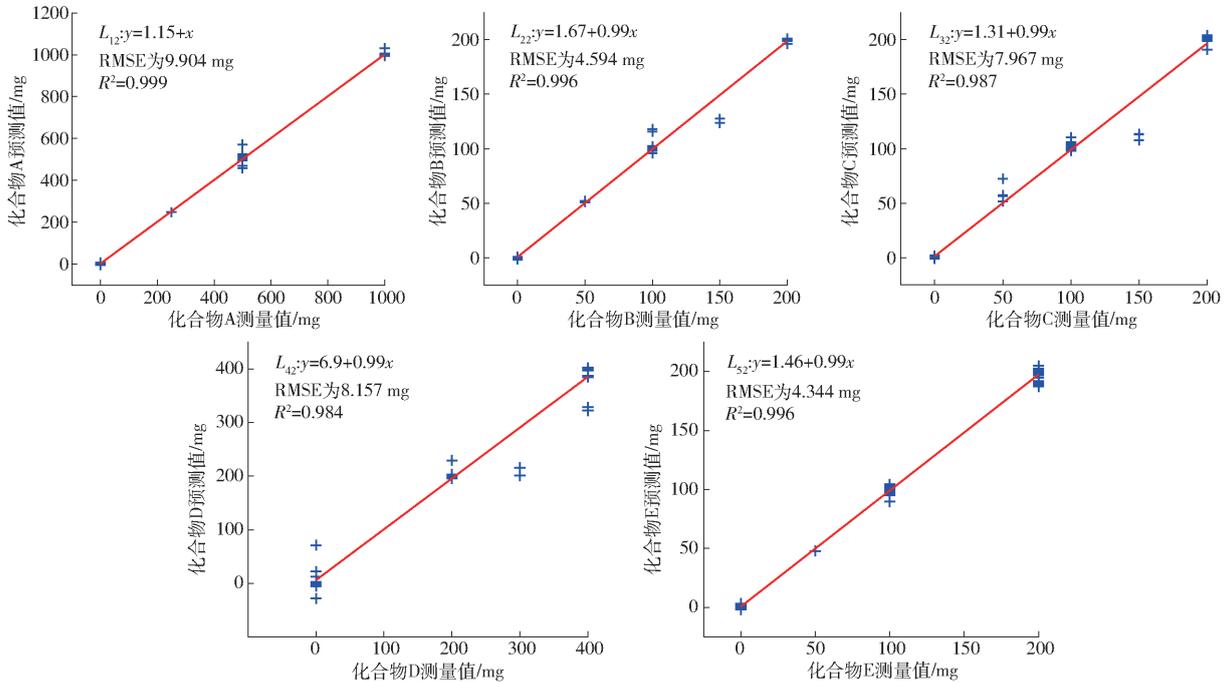


图7 基于SVR的营养液调控模型验证

Fig. 7 Validation of models for nutrient solution regulation based on SVR

的调控效果,本研究将基于SVR的营养液调控模型与逐步拟合响应模型获取调控目标值结果的误差进行比较。在温度试验区间16~28℃内以6℃的温度

梯度为例,在给定温度和准确营养液检测指标值的条件下对5种化合物含量进行预测,对比结果如图8所示。

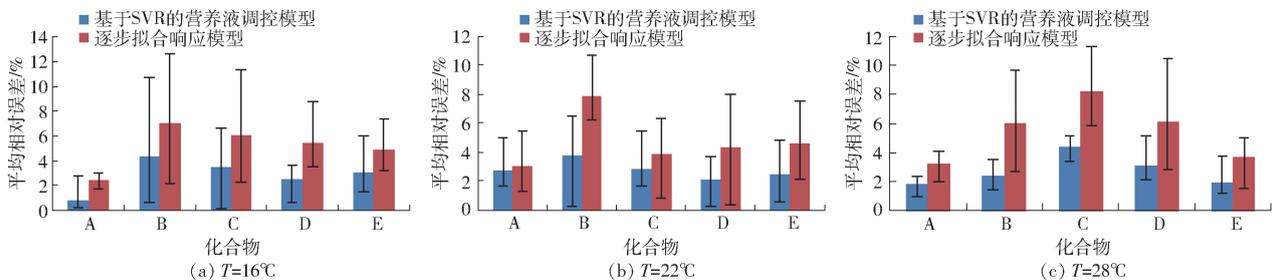


图8 基于SVR营养液调控模型的目标点获取与逐步拟合响应模型对比

Fig. 8 Comparison between nutrient solution regulation model target point and stepwise fitting response model

由图8可以看出,基于SVR的营养液调控模型相比于逐步拟合响应模型获取目标值的误差更小,其中5种化合物含量的平均相对误差分别降低了37.65%、49.94%、40.53%、50.58%、42.84%。说明该方法构建的营养液调控模型可以更准确地获取调控目标值,能够为设施作物营养液优化调控提供理论基础。

2.4.2 实际调控效果分析

为了验证基于SVR的营养液调控模型的实际

调控效果,同时采用逐步拟合响应模型进行实际调控效果试验与基于SVR的营养液调控模型实际调控效果进行对比。试验得到不同温度、不同化合物配比下的营养液5种化合物使用量如图9所示,因数据无法全部罗列,下文仅展示温度在16~28℃范围内,以3℃为步长的化合物使用量试验结果。

由图9可发现,对比于逐步拟合响应模型,基于SVR的营养液调控模型的调控精度更高、误差更小。分析得到的130组试验数据,首先计算每种化

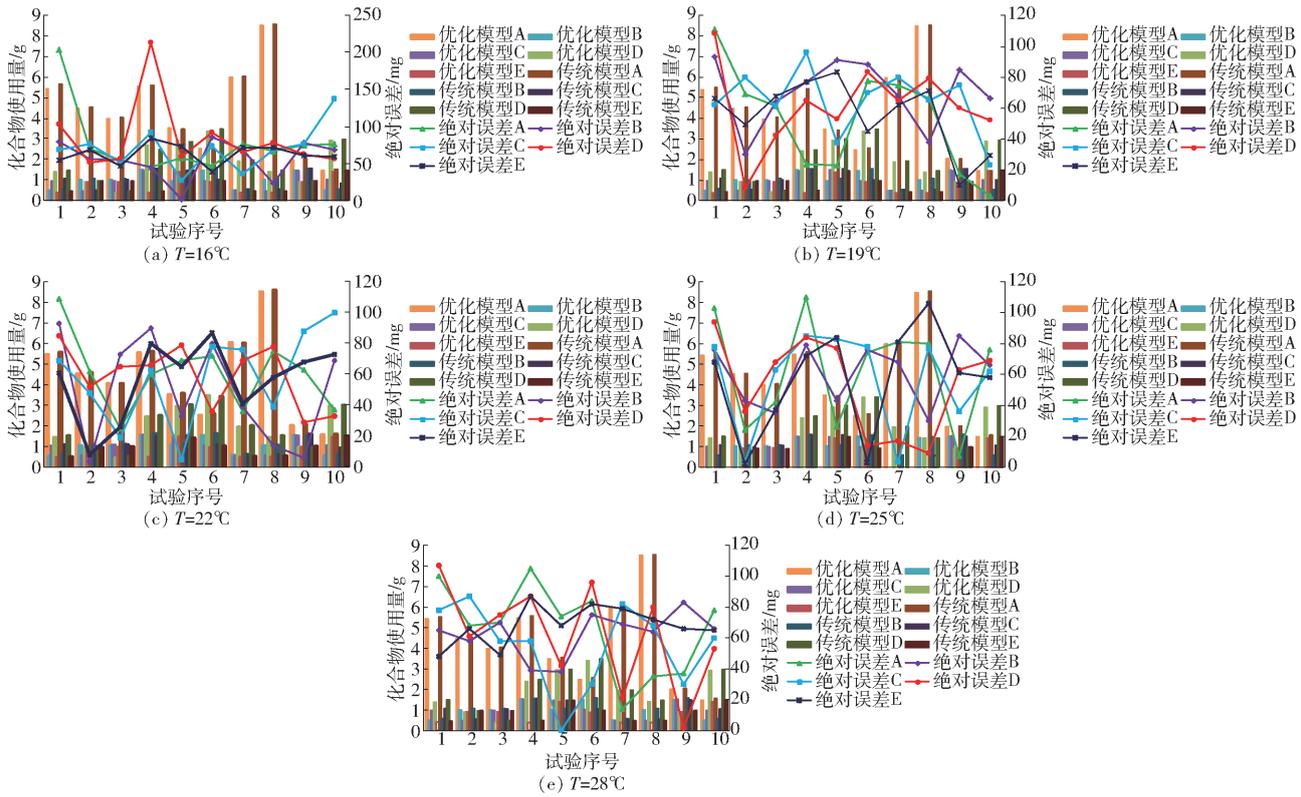


图 9 2 组调控模型下 5 种化合物使用量结果对比

Fig. 9 Comparison of usage of five compounds in two groups of regulatory models

合物实际使用量与理论使用量的相对误差,然后针对 130 组试验求得相对误差平均值,对比逐步拟合响应模型,基于 SVR 的营养液调控模型的 5 种化合物使用量的相对误差平均值分别降低了 46.42%、52.08%、54.03%、53.59%、54.54%;计算基于 SVR 的营养液调控模型中 5 种化合物的实际使用量对比逐步拟合响应模型 5 种化合物的实际使用量的降低率,然后针对 130 组试验数据求得 5 种化合物使用量的平均降低率分别为 1.69%、5.81%、5.85%、3.65%、7.08%。说明基于 SVR 的营养液调控模型进行营养液调控的方法,可以在保证检测指标值准确的情况下减少营养液 5 种化合物的供需量,对融合经济效益的营养液精准调控具有实际意义。本研究提出的基于 SVR 的营养液调控模型可在实时环境下对营养液调控目标值进行动态、高效的获取。

进一步分析可得,对比同一化合物配比、不同温度下的调控结果发现,基于 SVR 的营养液调控模型的 5 种化合物使用量基本保持稳定。说明融合温度变化的基于 SVR 的营养液调控模型可以在不同温度条件下有效完成营养液调控,为园艺学中作物栽培的实际生产应用提供技术依据。

3 结论

(1) 提出一种基于 SVR 的营养液调控模型,解决了设施栽培中营养液动态调配精度低的问题,可

为设施栽培中营养液精准调控提供参考。

(2) 构建的营养液检测指标预测模型的确定系数分别为 0.98、0.94、0.97、0.93、0.98,均方根误差分别为 1.73、3.81 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、1.79 mg/L、0.87 mg/L、1.53 mg/L。与 BP 神经网络和 ELM 网络构建的预测模型相比,能以更高精度拟合多因子输入下的营养液检测指标值。

(3) 基于 SVR 构建的营养液调控模型对应 5 种化合物含量的确定系数分别为 0.99、0.98、0.99、0.96、0.99,均方根误差分别为 4.29、7.39、5.02、2.85、3.96 mg,拟合效果良好。比 BP 神经网络和 ELM 网络构建的营养液调控模型能更准确地调控目标值。

(4) 对比逐步拟合响应模型获取调控目标值的结果发现,基于 SVR 的营养液调控模型 5 种化合物含量的平均相对误差分别降低了 37.65%、49.94%、40.53%、50.58%、42.84%;在调控效果验证试验中,对比逐步拟合响应模型发现,基于 SVR 的营养液调控模型 5 种化合物使用量的相对误差平均值分别降低了 46.42%、52.08%、54.03%、53.59%、54.54%,调控过程中 5 种化合物使用量的平均降低率分别为 1.69%、5.81%、5.85%、3.65%、7.08%。在不同温度下进行调控时,基于 SVR 的营养液调控模型 5 种化合物使用量基本保持稳定,能够基于实时环境对营养液进行动态、精准的调控。

参 考 文 献

- [1] WORTMAN S. Crop physiological response to nutrient solution electrical conductivity and pH in an ebb-and-flow hydroponic system [J]. *Scientia Horticulturae*, 2015, 194:34–42.
- [2] 苏苑君, 胡笑涛, 王瑞, 等. 不同氮磷钾水平对水培生菜产量和品质的影响 [J]. *仲恺农业工程学院学报*, 2014, 27(4): 15–19.
SU Yuanjun, HU Xiaotao, WANG Rui, et al. Effects of different N,P and K concentration on yield and quality of hydroponic lettuce [J]. *Journal of Zhongkai University of Agriculture and Engineering*, 2014, 27(4): 15–19. (in Chinese)
- [3] 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/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(增刊): 347–352, 393.
LI Shuaishuai, LI Li, MU Yonghang, et al. pH value control system of nutrient solution based on Fuzzy-Smith controller [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(Supp.): 347–352, 393. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2017s053&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.053. (in Chinese)
- [4] 赵倩, 王利春, 郭文忠, 等. 水培营养液硝态氮浓度在线标测系统研究 [J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(8): 203–209.
ZHAO Qian, WANG Lichun, GUO Wenzhong, et al. Construction and verification of on-line calibrating and measuring system about nitrate N in hydroponic nutrient solution [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(8): 203–209. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180824&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.024. (in Chinese)
- [5] 李娟, 周建民. 水培条件下 CO₂ 与 NH₄⁺/NO₃⁻ 对比对番茄幼苗生育的影响 [J]. *农业工程学报*, 2006, 22(7): 138–142.
LI Juan, ZHOU Jianmin. Effects of interactions between different NH₄⁺/NO₃⁻ ratios and CO₂ enrichment on growth and development of tomato seedlings under hydroponic culture conditions [J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(7): 138–142. (in Chinese)
- [6] AFAR-UL-HYE M, MAHMOOD F, DANISH S, et al. Evaluating efficacy of plant growth promoting rhizobacteria and potassium fertilizer on spinach growth under salt stress [J]. *Pakistan Journal of Botany*, 2020, 52(4): 1441–1447.
- [7] 闫秋艳. 根区温度对设施蔬菜生长生理及养分高效利用的影响研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
YAN Qiuyan. Effects of root zone temperature on growth physiology and nutrient efficient utilization of greenhouse vegetables [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)
- [8] ALBORNOZ F, LIETH J H. Daily macronutrient uptake patterns in relation to plant age in hydroponic lettuce [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2016, 39(10): 1357–1364.
- [9] URRESTARAZU M, DELCARMEN S, VALERA D, et al. Effect of heating nutrient solution on water and mineral uptake and early yield of two cucurbits under soilless culture [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2008, 31(3): 527–538.
- [10] 苏苑君. 水培生菜营养液最佳配比与品质调控试验研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
SU Yuanjun. Optimal proportion selection of nutrient solution and quality adjustment of hydroponic lettuce [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016. (in Chinese)
- [11] 潘杰, 李胜利, 孙治强. 水培生菜适宜营养液配方筛选研究 [J]. *河南农业科学*, 2007, 36(7): 87–89.
PAN Jie, LI Shengli, SUN Zhiqiang. Studies on the nutritional solutions of hydroponic lettuce [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2007, 36(7): 87–89. (in Chinese)
- [12] 马乐乐, 高宁, 杨百良, 等. 全有机营养模式下番茄综合品质评价及其对有机肥水耦合的响应 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(6): 63–72.
MA Lele, GAO Ning, YANG Bailiang, et al. Construction of integrated quality index of tomato with total organic nutrition and its response to organic fertilizer and water coupling [J]. *Journal of Northwest A&F University (Nat. Sci. Ed.)*, 2019, 47(6): 63–72. (in Chinese)
- [13] 牛寅, 张侃瑜. 基于云模型推理的施肥机营养液 pH 值调节过程控制 [J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(7): 57–64.
NIU Yin, ZHANG Kanyu. Regulating process control of pH value in nutrient solution of fertigation equipment based on cloud model inference [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(7): 57–64. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160709&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.009. (in Chinese)
- [14] BORGHESI E, CARMASSI G, UGUCCIONI M, et al. Effects of calcium and salinity stress on quality of lettuce in soilless culture [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2013, 36(5): 677–690.
- [15] WANG Lichun, CHEN Xiaoli, GUO Wenzhong, et al. Yield and nutritional quality of water spinach (*Ipomoea aquatica*) as influenced by hydroponic nutrient solutions with different pH adjustments [J]. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2017, 19(4): 635–642.
- [16] 于淑妹, 杨俊仙, 曹宗宏. 水培作物生长所需营养液投放周期模型 [J]. *阜阳师范学院学报(自然科学版)*, 2016, 33(2): 24–27.
YU Shumei, YANG Junxian, CAO Zonghong. Cycle model of sprinkling the required nutrition liquid for growth of hydroponic crop [J]. *Journal of Fuyang Normal University (Natural Science)*, 2016, 33(2): 24–27. (in Chinese)

- [17] 李莉, 王俊衡, 孟繁佳, 等. 基于二次混合机构的营养液调控模型与 PID 算法实现 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 100-106.
LI Li, WANG Junheng, MENG Fanjia, et al. Model and PID algorithm realization of nutrient solution control based on two-step fertilizer mixing system [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(22): 100-106. (in Chinese)
- [18] 毛罕平, 胡云辉, 左志宇, 等. 设施栽培中母液加入量与营养液 EC/pH 值的回归模型 [J]. 农机化研究, 2012, 34(2): 149-152.
MAO Hanping, HU Yunhui, ZUO Zhiyu, et al. Regression model of the mother liquid dosage and the value of EC/pH in facility cultivation [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(2): 149-152. (in Chinese)
- [19] 张智, 李曼宁, 杨志, 等. 基于多指标协同的草莓水肥耦合综合调控 [J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 267-276.
ZHANG Zhi, LI Manning, YANG Zhi, et al. Comprehensive regulation of water and fertilizer coupling based on multi-index collaboration of strawberry [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 267-276. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2002029&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.029. (in Chinese)
- [20] SAVVAS D, CHATZIEUSTRATIOU E, PERUOLARAKI G, et al. Modelling Na and Cl concentrations in the recycling nutrient solution of a closed-cycle pepper cultivation [J]. Biosystems Engineering, 2008, 99(2): 282-291.
- [21] 王瑞, 胡笑涛, 王文娥, 等. 水培菠菜不同配方的产量、品质主成分分析研究 [J]. 北方园艺, 2016(10): 27-31.
WANG Rui, HU Xiaotao, WANG Wene, et al. Study on different nutrient solution formula hydroponics on spinach yield, quality and major elements of consumption [J]. Northern Horticulture, 2016(10): 27-31. (in Chinese)
- [22] 张淼, 阳清亮, 潘林沛. 基于双标图差异分析的离子选择电极营养液建模研究 [J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(增刊): 200-206.
ZHANG Miao, YANG Qingliang, PAN Linpei. ISE modeling of hydroponic formula based on biplot method difference analysis [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.): 200-206. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2019s031&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.031. (in Chinese)
- [23] 艾海波, 魏晋宏, 邱权, 等. 微型植物工厂智能控制系统 [J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊2): 198-204.
AI Haibo, WEI Jinhong, QIU Quan, et al. Design of intelligent control system for micro plant factory [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp.2): 198-204. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2013s237&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S2.037. (in Chinese)
- [24] 胡瑾, 田紫薇, 汪健康, 等. 基于离散曲率的温室 CO₂ 优化调控模型研究 [J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 337-346.
HU Jin, TIAN Ziwei, WANG Jiankang, et al. Carbon dioxide optimal control model based on discrete curvature [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 337-346. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190939&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.039. (in Chinese)
- [25] 张亨年, 张川, 闫浩芳, 等. 渗灌管首末端压力与茶树根区土壤水分运移关系 [J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(6): 613-625.
ZHANG Hengnian, ZHANG Chuan, YAN Haofang, et al. Relationship between subsurface seepage pipe pressure and soil water movement at tea root zone [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2020, 38(6): 613-625. (in Chinese)
- [26] 钟宝江, 廖文和. 基于精化曲线累加弦长的角点检测技术 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16(7): 939-943.
ZHONG Baojiang, LIAO Wenhe. Corner detection based on accumulative chord length of refined digital curves [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2004, 16(7): 939-943. (in Chinese)
- [27] 胡瑾, 闫珂, 何东健, 等. 基于改进鱼群算法的番茄光环境调控目标值模型 [J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 260-265.
HU Jin, YAN Ke, HE Dongjian, et al. Light environment regulation target model of tomato based on improved fish swarm algorithm [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 260-265. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160135&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.035. (in Chinese)
- [28] 王永, 司炜, 孙德敏, 等. 温室营养液循环检测系统中离子选择电极的数学建模与测量 [J]. 农业工程学报, 2003, 19(4): 230-233.
WANG Yong, SI Wei, SUN Demin, et al. Modeling and measurement of ion-selective electrode of nutrient solution measuring system in greenhouse [J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(4): 230-233. (in Chinese)