

基于斜率-截距校正算法的番茄营养液 ISE 监测

张 淼^{1,2} 潘林沛¹ 阳清亮¹ 郑 杰¹ 陈 铭¹ 汪懋华¹

(1. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 中国农业大学农业部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 利用斜率-截距校正算法(SBC)解决离子选择电极连续在线测量电势漂移问题,结合 Nernst 线性模型预测无土栽培番茄苗期至果期营养液 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 含量变化。结果表明:SBC 校正算法可有效减少离子选择电极(ISE)电势漂移,提高线性预测模型重复性,校正后 ISE 响应斜率漂移范围不超过 0.4 mV/decade,截距漂移范围可控制在 1 mV 以内。SBC 校正算法可提高 Nernst 线性模型预测精度, $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 含量预测平均相对误差分别从校正前的 43.31%、38.46%、93.83% 降至校正后的 5.99%、7.44%、27.96%。校正后 ISE 可实现番茄营养液在线连续监测,反映营养液中目标离子含量变化。番茄花期养分吸收较活跃, $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 含量分别下降 45.19%、36.46% 和 27.92%。

关键词: 番茄; 离子选择电极; 斜率-截距校正; 监测; 无土栽培

中图分类号: S24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)05-0342-06

ISE Monitoring of Macronutrients in Hydroponic Tomato Cultivation Based on Slope and Bias Correction Method

ZHANG Miao^{1,2} PAN Linpei¹ YANG Qingliang¹ ZHENG Jie¹ CHEN Ming¹ WANG Maohua¹

(1. Key Laboratory on Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology, Ministry of Agriculture, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Monitoring macronutrients in hydroponic nutrient solution is a vital task for tomato growth. Ion-selective electrodes (ISEs) were used to detect the $\text{NO}_3\text{-N}$, K^+ , Ca^{2+} concentrations. The slope and bias correction (SBC) method was applied to alleviate the signal drift of ISEs due to continuous immersion in nutrient solutions. The slopes of response Nernst equation for NO_3^- , K^+ , Ca^{2+} ISEs were decreased to 0.05, 0.39 and 0.04, and intercept potentials were reduced to 0.12 mV, 0.93 mV and 0.10 mV, respectively. It indicted the capacity of slope and bias correction method as improving the repeatability and consistency of each ISE's Nernst equation. Then the $\text{NO}_3\text{-N}$, K^+ and Ca^{2+} concentrations were predicted by Nernst model, and they were measured by spectrographic method to provide standard values. The predicted accuracy of $\text{NO}_3\text{-N}$, K^+ , Ca^{2+} concentrations was improved after using slope and bias correction method, providing by the relative errors were significantly reduced from 43.31%, 38.46% and 93.83% to 5.99%, 7.44% and 27.96%, respectively. It was obvious that the results obtained from ISEs coupled with slope and bias correction method could indeed reflect the macronutrients component in tomato nutrient solutions. The assimilation of macronutrients was activated in flower stage, with the decrease of 45.19%, 36.46% and 27.92% for $\text{NO}_3\text{-N}$, K^+ and Ca^{2+} concentrations, respectively.

Key words: tomato; ion-selective electrode; slope and bias correction; monitoring; hydroponic cultivation

收稿日期: 2017-11-10 修回日期: 2017-12-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD07003-2016YFD0700304、2016YFD0800900-2016YFD0800907)、云南省汪懋华院士工作站项目(2015IC016)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(2017XD002)

作者简介: 张淼(1982—),女,副教授,主要从事基于电化学原理的土壤养分传感技术研究,E-mail: zhangmiao@cau.edu.cn

0 引言

氮、钾、钙是无土栽培营养液的主要养分^[1-3], 需依据其丰缺, 合理调控营养液配比, 使作物根际环境满足生长需求^[4-5]。

现有营养液养分监测多使用电导率(EC)和酸碱度(pH 值)传感器^[6-7], 实现了营养液总离子含量和各养分状态、转化和有效程度的定性分析^[8-9]。应用中, 仅依据 EC 及 pH 值传感信息作为营养液调控参考, 存在无法定量监测特定单体养分、易导致养分失衡等问题^[10-11]。

离子选择电极(Ion-selective electrode, ISE)近年来被应用于营养液养分监测。XAVIER 等^[12]利用 ISE 阵列监测无土栽培番茄营养液中的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 含量, 作物生长期中 3 参数变化明显, 含量波动范围分别为 25 ~ 240 mg/L、5 ~ 250 mg/L、50 ~ 190 mg/L。KIM 等^[13]利用 ISE 阵列监测辣椒营养液中的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 K^+ 变化情况, ISE 预测精度分别达到 15.8、6.8 mg/L。JUNG 等^[14]使用 ISE 监测生菜营养液 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 等成分, 基于两点校正算法修正 Nernst 线性模型, 结果表明 3 养分参量变化范围分别为 200 ~ 310 mg/L、90 ~ 250 mg/L、40 ~ 80 mg/L, 预测精度达到 10、18、6.2 mg/L。

文献[13, 15-16]也报道了 ISE 在线监测稳定性不理想, 检测电势存在漂移的问题, 因尚缺乏有效数据处理方法, 电极法营养液监测可行性受到质疑。斜率-截距校正(Slope and bias correction, SBC)算法所需样本数目少, 计算消耗小, 适用于剔除由仪器自身不稳定而导致的检测信号波动^[17], 常被用于光谱数据预处理。

综上, 本文以提高基于 ISE 的营养液 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 K^+ 和 Ca^{2+} 监测稳定性、精度为目标, 探索使用 SBC 校正算法修正 ISE 检测电势漂移, 并验证校正后模型预测性能, 使用 ISE 连续监测番茄营养液, 分析其在线检测养分变化的可行性。

1 材料与方方法

1.1 理论方法

1.1.1 斜率-截距校正

斜率-截距校正利用标准值与偏移值之间斜率、截距关系校正数据。本研究中, 利用其建立了标准检测电势和漂移电势之间斜率和截距表达式, 即

$$E_{\text{Correct}} = KE_{\text{Raw}} + B \quad (1)$$

$$\text{其中 } B = \bar{E}_{\text{base}} - K\bar{E}_{\text{drift}} \quad (2)$$

$$K = \frac{S_{yy} + S_{xx} + \sqrt{(S_{yy} - S_{xx})^2 + 4S_{xy}^2}}{2S_{xy}} \quad (3)$$

$$S_{xy} = \sum_{j=1}^N (E_{\text{drift}_j} - \bar{E}_{\text{drift}})(E_{\text{base}_j} - \bar{E}_{\text{base}}) \quad (4)$$

$$S_{yy} = \sum_{j=1}^N (E_{\text{base}_j} - \bar{E}_{\text{base}})^2 \quad (5)$$

$$S_{xx} = \sum_{j=1}^N (E_{\text{drift}_j} - \bar{E}_{\text{drift}})^2 \quad (6)$$

式中 K ——校正系数, 表征漂移电势与标准电势的校正比例

B ——校正基准电势, mV

E_{base} ——标准电势, 即第 1 次测量 4 组标准溶液的 NO_3^- 、 K^+ 、 Ca^{2+} 电势, mV

\bar{E}_{base} ——标准电势的平均值, mV

E_{drift} ——漂移电势, 即不同时间用相同 ISEs 测量标准溶液的电势, mV

\bar{E}_{drift} ——漂移电势的平均值, mV

N ——样本个数

E_{Raw} ——漂移电势组成的数组, 即实际营养液样本测得的相应离子电势, mV

E_{Correct} ——校正后的电势, mV

1.1.2 Nernst 模型

离子选择电极利用离子敏感膜的选择性测量溶液中离子浓度, 检测的电势与目标离子浓度之间满足 Nernst 方程, 即

$$E_{\text{Correct}_i} = S \lg C_i + E_0 \quad (7)$$

式中 S ——响应斜率, mV/decade, decade 为 10 倍物质的量浓度电化学标准单位

E_0 ——截距电势, mV

C_i ——目标离子物质的量浓度, mol/L

1.2 仪器与试剂

试验采用的仪器有 UV-2450 型紫外可见分光光度计(日本 Shimadzu 公司), M410 型火焰光度计(英国 Sherwood 公司)。TetraCon 925 型 EC 传感器和 FDO925 型 DO 传感器(德国 WTW 公司)。其他材料: pH 值电极(型号 PH6000, 美国 Sensorex 公司), 所有试剂为分析纯等级(国药集团化学试剂北京有限公司)。所用溶液皆采用去离子水配置。

硝酸根(NO_3^-)、钾离子(K^+)和钙离子(Ca^{2+})检测用 ISE 由美国 Thermo Scientific Orion 公司生产, 型号分别为 No. 9707BNMP、No. 9719BNMP 和 No. 9720BNMP。根据 ISE 使用说明, ISE 使用前需要提前浸泡在活化溶液中 2 h, NO_3^- ISE、 K^+ ISE、 Ca^{2+} ISE 的活化溶液分别为 100 mg/L 硝酸钾(KNO_3)、39.1 mg/L 氯化钾(KCl)和 100 mg/L 氯化钙(CaCl_2)。另单独配置 25、75、100、250 mg/L KNO_3 溶液和 50、150、250、350 mg/L KCl 溶液以及 20、50、150、250 mg/L CaCl_2 溶液作为 NO_3^- 、 K^+ 、

Ca²⁺ ISE 标定溶液。

本文无土栽培作物选择为番茄,采用无机无土栽培方式,作物生长期仅供无机化肥,无其他形式养分供给。实验于中国农业大学水利与土木工程学院

实验温室中开展。番茄营养液配方采用标准山崎番茄营养液配方,主要养分浓度如表 1 所示。实验选取 121 组样本,浓度范围根据无土栽培番茄种植规范选取^[18],具体如表 2 所示。

表 1 番茄营养液山崎配方

Tab. 1 Yamasaki recipe for tomato hydroponic cultivation

元素	NO ₃ -N	K	Ca	PO ₄ -P	Mg	SO ₄ -S	NH ₄ -N
质量浓度/(mg·L ⁻¹)	98.0	156.4	120.0	61.6	48.6	64.1	9.3

表 2 测试样本信息

Tab. 2 Information of testing samples

项目	标定	建模	验证
NO ₃ -N 质量浓度/ (mg·L ⁻¹)	25.0 ~ 250.0	30.0 ~ 250.0	39.2 ~ 243.4
K ⁺ 质量浓度/ (mg·L ⁻¹)	50.0 ~ 350.0	85.0 ~ 270.0	94.3 ~ 269.3
Ca ²⁺ 质量浓度/ (mg·L ⁻¹)	20.0 ~ 250.0	30.0 ~ 250.0	37.9 ~ 225.9
EC/(μS·cm ⁻¹)			1 272 ~ 3 440
pH 值	4.0 ~ 9.2		5.5 ~ 7.5
样本数	12	49	60
类别	人工配制	人工配制	番茄营养液

测试样本中:12 组人工配制溶液分别用于 NO₃⁻、K⁺、Ca²⁺ ISE 标定;49 组人工配制的标准混合溶液用于 Nernst 建模,60 组水培番茄营养液用于模型验证。取自实际水培番茄营养液的 60 组样本,利用紫外分光光度计测量 NO₃-N 含量,利用火焰光度计测量 K⁺、Ca²⁺ 含量,作为标准值使用。

试验监测期为 84 d,监测参数包括 NO₃-N、K⁺ 和 Ca²⁺ 浓度、溶解氧浓度(DO)、EC 和 pH 值。营养液每周更换一次,84 d 共更换 13 次。根据番茄生长期特点,分别以第 1 朵花开、第 1 次结果和第 1 个果实成熟为标志,将监测期划分为花期、果期及果实成熟结束监测期,根据番茄生长情况记录

为:苗期(第 1 天~第 22 天)、花期(第 23 天~第 44 天)、果期(第 45 天~第 84 天)。

1.3 营养液养分检测系统

营养液养分浓度测定系统结构如图 1 所示。其中,传感器阵列、流体控制单元、数据采集器和上位机等模块实现系统检测功能^[19]。流体控制单元完成营养液自动循环及传输功能。数据采集单元和流体控制单元通过串口与上位机软件进行通信。上位机软件可采用手动及自动两种模式,可设置蠕动泵工作时间,接收采集单元传送的数据,进而实现 ISEs 检测电势的校准与养分浓度分析。

2 结果与分析

2.1 电势漂移校正

使用斜率-截距校正算法分别校正 NO₃⁻、K⁺ 和 Ca²⁺ ISEs 检测电势漂移,结果如图 2 所示。

如图 2 所示,在同一浓度标准溶液下,NO₃⁻、K⁺、Ca²⁺ 等各种离子的 ISE 检测电势随时间漂移较大,波动明显,各 ISE 最大漂移分别为 31.09、30.39、18.5 mV,平均漂移分别为 13.81、12.73、12.52 mV。经斜率-截距校正后,检测电势漂移问题明显得到改善,数据扰动基本剔除,各个 ISE 的检测电势平均偏差分别减小为 0.59、2.07、0.26 mV,ISEs 的相应电势随标准溶液浓度变化的梯度更加明显。斜率-校

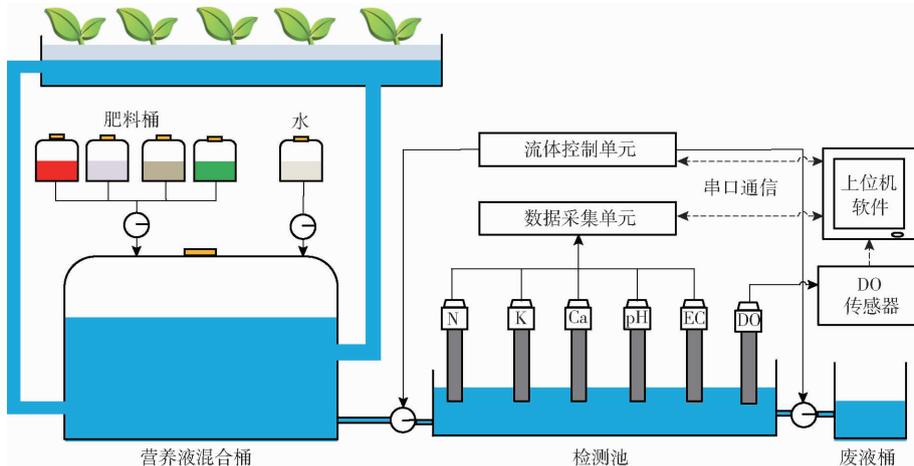


图 1 ISEs 营养液养分含量监测系统结构

Fig. 1 Structure diagram of hydroponic monitoring system based on ISEs

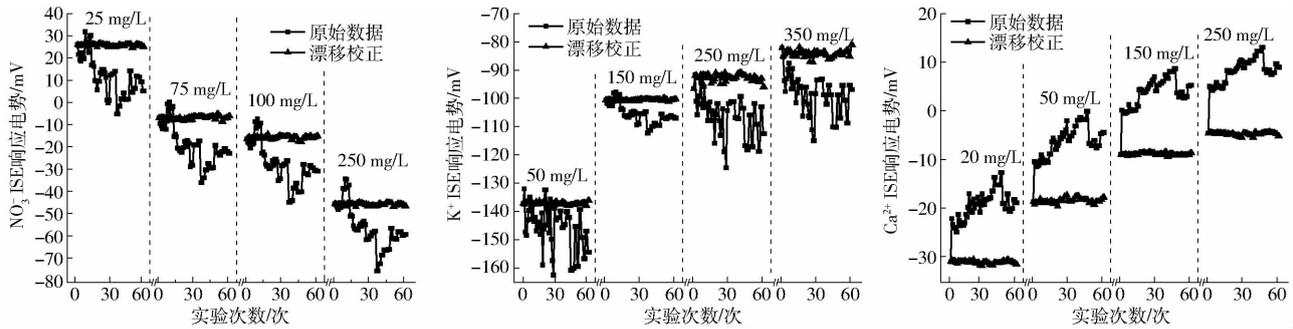


图 2 原始数据与斜率-截距校正处理对比

Fig. 2 Comparison results between raw data and SBC-calibration data

正算法对多种 ISEs 随检测时间增加而产生的响应电势漂移的解决效果明显。

从 NO₃⁻、K⁺、Ca²⁺ ISE 的 60 组实验中随机选取 3 组,利用原始数据和校正后数据分别建立 ISEs 的 Nernst 线性模型,模型预测效果统计如表 3 所示。由表 3 可知,原始数据的 NO₃⁻、K⁺、Ca²⁺ 电极 Nernst 响应斜率波动范围分别为 11.43%、10.49% 和 4.5%,截距电势波动范围达 16.29%、48.06% 和 20.17%;经过校正后的 Nernst 斜率和截距电势均较

为稳定,2 个参数的波动范围皆明显优于原始数据。各电极响应斜率波动范围分别减小为 0.07%、0.61%、0.15%,截距电势波动范围分别减小为 0.07%、2.00%、0.19%,几乎与基础参数保持一致。

经斜率-截距校正算法处理,ISEs 预测模型的稳定性得到了明显提高,有效消减了离子选择电极 (ISE) 电势漂移现象,校正后 ISE 检测电势平均偏差可以控制在 2.1 mV,响应斜率漂移范围不超过 0.40 mV/decade,截距漂移范围可控制在 1 mV 以内。

表 3 漂移校正前后 ISEs 线性 Nernst 预测模型比较

Tab. 3 Comparison on linear Nernst models of ISEs between raw data and SBC-processed data

ISE	组序	原始数据		漂移校正	
		响应斜率 $S/(mV \cdot decade^{-1})$	截距电势 E_0/mV	响应斜率 $S/(mV \cdot decade^{-1})$	截距电势 E_0/mV
NO ₃ ⁻	1	-67.30 ± 3.88	-162.79 ± 6.39	-71.17 ± 0.01	-169.19 ± 0.01
	2	-56.86 ± 14.30	-132.96 ± 29.82	-71.15 ± 0.02	-169.15 ± 0.04
	3	-62.08 ± 9.04	-163.59 ± 30.62	-71.07 ± 0.09	-168.99 ± 0.20
	均值	-62.09	-153.11	-71.13	-169.11
	RMSE	7.10	24.95	0.05	0.12
K ⁺	1	56.28 ± 6.68	31.39 ± 14.07	63.37 ± 0.40	46.42 ± 0.95
	2	55.35 ± 7.61	17.96 ± 7.50	63.34 ± 0.37	46.36 ± 0.89
	3	56.28 ± 2.47	16.45 ± 9.01	63.36 ± 0.39	46.40 ± 0.93
	均值	57.37	21.93	63.36	46.40
	RMSE	6.02	10.54	0.39	0.93
Ca ²⁺	1	26.88 ± 0.97	64.75 ± 11.51	25.97 ± 0.06	53.40 ± 0.16
	2	27.51 ± 1.60	66.30 ± 13.06	25.91 ± 0.01	53.24 ± 0.01
	3	26.95 ± 1.05	68.68 ± 15.44	25.89 ± 0.01	53.19 ± 0.04
	均值	27.12	66.57	25.93	53.28
	RMSE	1.24	13.43	0.04	0.10

2.2 模型预测

斜率-截距算法校正前后 Nernst 模型预测 NO₃-N、K⁺、Ca²⁺ 含量与光学法测定结果如图 3 所示。

原始数据预测 NO₃-N 含量的线性方程为 $y = 1.20x + 10.21$,模型决定系数 $R^2 = 0.46$,Nernst 模型预测结果与标准值线性关系差,NO₃-N 含量预测值与标准值误差较大。经斜率-截距校正后,线性方程为 $y = 0.97x + 0.08$,斜率接近 1,截距接近 0,模型决定系数 $R^2 = 0.95$,ISE 预测结果与标准值线性关系显著,较未校正前明显提高。NO₃-N 含量的平均绝对误差和相对误差分别从 43.12 mg/L、43.31% 减

少为 6.51 mg/L、5.99%,符合通用营养液中 NO₃-N 含量的相对误差标准(约 7.5%)。

K⁺ 含量原始数据预测结果线性回归方程为 $y = 0.62x + 102.18$ 。线性回归方程截距较大,表明 K⁺ 浓度预测值偏离标准值;模型决定系数 $R^2 = 0.08$,预测值与标准值之间线性关系差。K⁺ 含量平均绝对误差和相对误差分别为 57.55 mg/L、38.46%。显见原始数据预测结果无法反映番茄营养中 K⁺ 浓度的真实值。校正后数据预测结果线性回归方程为 $y = 0.97x - 2.27$,斜率接近 1,截距接近 0,模型具有较好预测能力,模型决定系数为 $R^2 = 0.85$,K⁺ 浓度

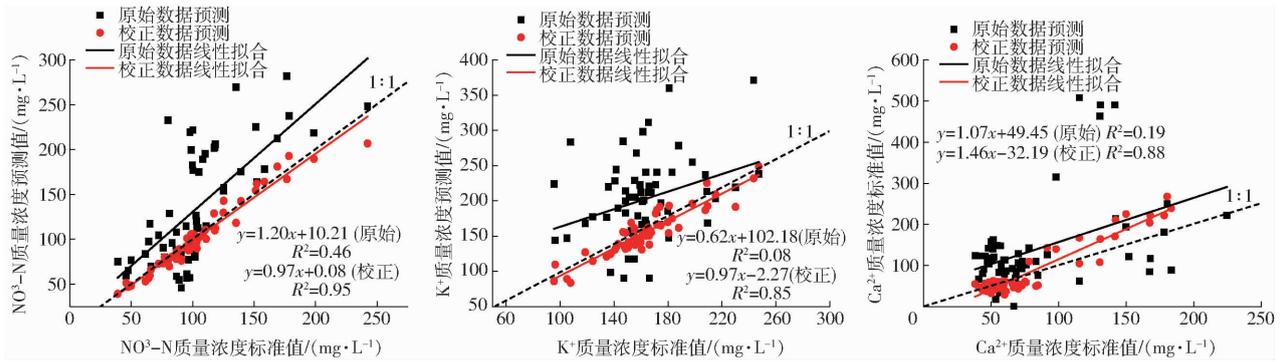


图3 Nernst模型预测值与标准值之间的线性关系

Fig. 3 Linear relationship of predicted and expected macronutrients concentrations

预测值与标准值线性关系显著。K⁺含量平均绝对误差和相对误差分别为 12.16 mg/L、7.44%，较未校正前显著降低。

原始数据预测 Ca²⁺ 含量线性方程为 $y = 1.07x + 49.45$ ，模型决定系数 $R^2 = 0.19$ ，平均绝对误差大于 50 mg/L，相对误差为 93.83%，预测值严重偏离标准值。校正后线性方程为 $y = 1.46x - 32.19$ 平均绝对误差为 27.85 mg/L，相对误差为 27.96%，较未校正前显著下降，模型决定系数显著提高 ($R^2 = 0.88$)，表明经斜率-截距校正后，基于 Ca²⁺ ISE 的预测结果与标准值具有较高的相关性。但校正后结果仍不符合标准误差，这与 Ca²⁺ 检测浓度受营养液复杂环境的未知影响密切相关^[13]，合适的预测校正模型将是后期研究的重点。

2.3 营养液养分监测

NO₃-N、K⁺ 和 Ca²⁺ 浓度、DO、EC 和 pH 值监测结果，如图 4 所示。图中垂直虚线表示营养液更换时间。由图 4 可得，84 d 观察期内，DO 保持在 9 mg/L 以上，波动范围极小，最大为 1.4 mg/L，满足番茄生长过程所需溶解氧含量。由于番茄生长时根系分泌酸碱类物质，用硫酸或氢氧化钠调节营养液 pH 值保持在适宜的范围 (5.5 ~ 7.0)^[20]。

番茄苗期营养液中 NO₃-N、Ca²⁺ 含量变化幅度小，K⁺ 含量波动大，12 d 后 NO₃-N 以及 K⁺ 含量呈下降趋势，表示番茄养分吸收活跃。番茄花期营养液各养分浓度变化趋势较一致，在更换营养液前逐渐下降，NO₃-N、K⁺ 和 Ca²⁺ 质量浓度变化范围为 87.29 ~ 47.84 mg/L (下降 45.19%)、149.76 ~ 95.15 mg/L (下降 36.46%)、84.76 ~ 61.09 mg/L (下降 27.92%)，期间 NO₃-N 含量变化范围最大，表明番茄对其需求量最大。营养液 EC 反映溶液中可溶性离子含量，EC 越高，可溶性离子浓度也越高^[20]。苗期和花期营养液 EC 变化小，保持在 1300 μS/cm 左右，表明期间营养液养分较平衡。番茄果期 EC 缓慢上升，与营养液养分浓度变化趋势保持一致，表明期间植物蒸腾作用显著，水分消耗大于单一养分吸收。

综上，结合斜率-截距校正算法以及 Nernst 模型，ISEs 阵列可有效监测番茄生长过程中营养液养分含量变化情况。较传统 EC、pH 值监测可提供更多营养液养分变化信息。

3 结论

(1) SBC 校正算法明显提高了 ISE 检测电势数据稳定性，提高了线性预测模型的重复性。ISE 校正后检

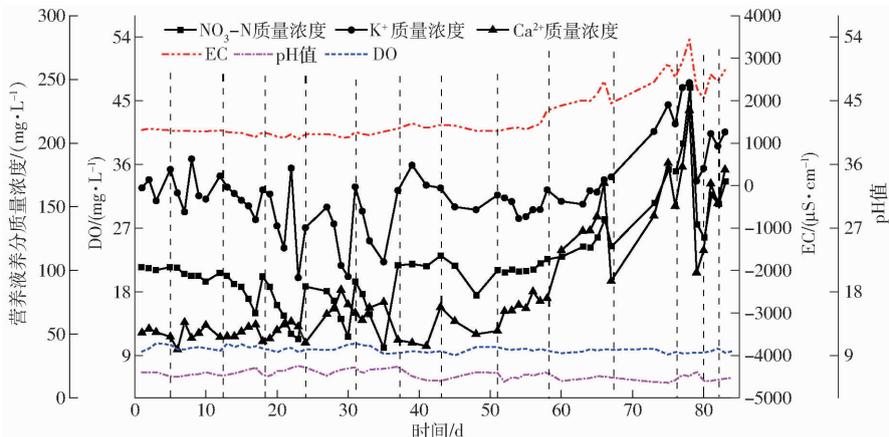


图4 营养液养分质量浓度随时间的变化曲线

Fig. 4 Changing curves of macronutrients components in nutrient solution with time

测电势平均误差可控制在 2.1 mV, 响应斜率波动不超过 0.4 mV/decade, 截距波动可控制在 1 mV 以内。

(2) 利用 SBC 校正算法处理 ISEs 检测电势数据, Nernst 模型预测精度显著提高。NO₃-N、K⁺、Ca²⁺ 含量预测平均相对误差分别从 43.31%、

38.46%、93.83% 降至 5.99%、7.44%、27.96%。

(3) ISEs 监测番茄生长期营养液 NO₃-N、K⁺、Ca²⁺ 含量变化, 结果显示, 番茄花期养分吸收较苗期和果实成熟期更为活跃, 3 种养分含量分别下降了 45.19%、36.46% 和 27.92%。

参 考 文 献

- 1 BAS B, JELTE R. Symbiotic nitrogen fixation in legumes: perspectives for saline agriculture [J]. *Environmental & Experimental Botany*, 2013, 92: 134 - 143.
- 2 周德超. 氮、磷、钾在植物体中的主要生理作用及植物对养分的吸收[J]. *生物学通报*, 1983(5): 9 - 10.
ZHOU Dechao. Main physiological functions of nitrogen, phosphorus and potassium and the absorption of nutrients in plants[J]. *Bulletin Biology*, 1983(5): 9 - 10. (in Chinese)
- 3 邢禹贤. 新编无土栽培原理与技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002.
- 4 陈善敏. 酸铝胁迫下钙离子营养对植物生长的作用研究[D]. 南京: 南京大学, 2000.
CHEN Shanmin. Effect of calcium nutrition on plant growth under acidic aluminum stress[D]. Nanjing: Nanjing University, 2000. (in Chinese)
- 5 熊静, 陈清, 王敬国, 等. 供液方式对番茄基质栽培盐分累积与养分利用率的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(2): 224 - 231. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170230&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.030.
XIONG Jing, CHEN Qing, WANG Jingguo, et al. Effect of culture systems on salt accumulation in substrate and nutrient use efficiency of tomato [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(2): 224 - 231. (in Chinese)
- 6 SAM E W. Crop physiological response to nutrient solution electrical conductivity and pH in an ebb-and flow hydroponic system [J]. *Scientia Horticulturae*, 2015, 194: 34 - 42.
- 7 袁洪波, 王海华, 庞树杰, 等. 日光温室封闭式栽培系统的设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(21): 159 - 165.
YUAN Hongbo, WANG Haihua, PANG Shujie, et al. Design and experiment of closed culture system for solar greenhouse [J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(21): 159 - 165. (in Chinese)
- 8 赵倩. 无土栽培营养液在线测控系统研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2016.
ZHAO Qian. Studies on online-measuring and controlling system for nutrient solution of soilless culture [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2016. (in Chinese)
- 9 毛罕平, 谢明岗, 王多辉. 无土栽培营养液循环灌溉系统[J]. *排灌机械*, 1997(2): 49 - 52.
MAO Hanping, XIE Minggang, WANG Duohui. Nutrient liquid circulating irrigation system in soilless cultivation [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 1997(2): 49 - 52. (in Chinese)
- 10 MANUEL G, SALVADOR A, RAFAELA C, et al. Nutrient solution monitoring in greenhouse cultivation employing a potentiometric electronic tongue [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, 56(6): 1810 - 1817.
- 11 GEOFFREY R C, MIKE A D, KARIN E A. Evaluation of sensor technologies for automated control of nutrient solutions in LSS using higher plants [C] // Sixth European Symposium on Space Environmental Control System. Noordwijk European Space Agency, 1997: 851 - 857.
- 12 XAVIER R R, FRANCISCO J A, JORDI R, et al. Computer-operated analytical platform for the determination of nutrients in hydroponic systems [J]. *Food Chemistry*, 2014(147): 92 - 97.
- 13 KIM H J, KIM W K, ROM M Y, et al. Automated sensing of hydroponic macronutrients using a computer-controlled system with an array of ion-selective electrodes [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2013, 93: 46 - 54.
- 14 JUNG D H, KIM H J, CHOI G L, et al. Automated lettuce nutrient solution management using an array of ion-selective electrodes [J]. *Transactions of the ASABE*, 2015, 1309 - 1319.
- 15 任海燕. 基于离子选择电极的多通道养分检测系统改进研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.
REN Haiyan. Research on improvement of a multi-channel nutrients detection system based on the ion-selective electrodes [D]. Beijing: China Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- 16 张森, 孔盼, 李雁华, 等. 基于极限学习机的土壤硝态氮预测模型研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(6): 93 - 99. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160612&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.012.
ZHANG Miao, KONG Pan, LI Yanhua, et al. Prediction model of soil NO₃-N concentration based on extreme learning machine [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(6): 93 - 99. (in Chinese)
- 17 MACHO S, RIUS A, CALLAO M P, et al. Monitoring ethylene content in heterophasic copolymers by near-infrared spectroscopy standardisation of the calibration model [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2001, 445(2001): 213 - 220.
- 18 HOWARD M R. *Hydroponic food production* [M]. America: CRC Press, 2013.
- 19 任海燕, 张森, 孔盼, 等. 基于多参数融合的土壤硝态氮检测方法[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(增刊): 96 - 101. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2015S017&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.S0.017.
REN Haiyan, ZHANG Miao, KONG Pan, et al. Prediction of soil nitrate-nitrogen based on sensor fusion [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(Supp.): 96 - 101. (in Chinese)
- 20 张健, 李孝良, 孔卫晨, 等. 智能温室水培番茄结果期营养液性质及养分动态研究[J]. *安徽科技学院学报*, 2015, 29(6): 23 - 29.
ZHANG Jian, LI Xiaoliang, KONG Weichen, et al. Study on the dynamics of nutrient solution properties and nutrient contents of intelligent greenhouse hydroponic tomato [J]. *Journal of Anhui Science and Technology University*, 2015, 29(6): 23 - 29. (in Chinese)