

供液方式对番茄基质栽培盐分累积与养分利用率的影响

熊静^{1,2} 陈清¹ 王敬国¹ 刘伟²

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 2. 北京市农林科学院蔬菜研究中心, 北京 100097)

摘要: 研究了开放式和封闭式供液方式下番茄根区盐分累积强度、盐分离子组成与比例变化特征、番茄养分含量特征、养分利用效率, 分析了盐分累积对番茄产量和脐腐病患病率的影响。结果表明: 开放式和封闭式根区电导率均随生育期的延长不断上升, 开放式根区溶液电导率最高为 11.9 mS/cm, 封闭式为 17.2 mS/cm; 开放式和封闭式根区盐分离子组成由大到小为 NO_3^- 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 H_2PO_4^- ; 开放式和封闭式根区溶液离子比例失衡特征与程度相当, 均表现为 K^+ 、 Ca^{2+} 和 H_2PO_4^- 比例降低, Mg^{2+} 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 比例上升; 番茄产量随电导率的增加而降低, 果实脐腐病患病率则随电导率和离子比例失衡程度的增加而增加, 到采收后期开放式和封闭式果实脐腐病患病率分别高达 29.7% 和 36.6%; 与开放式相比, 封闭式供液方式下番茄 N、P、K、Ca、Mg 和 S 养分利用率分别提高 11.6%、19.6%、18.9%、11.8%、37.3% 和 15.9%。开放式和封闭式基质栽培根区均存在盐分累积和离子比例失衡现象, 为控制根区离子比例失衡和果实缺 Ca 现象, 在番茄进入坐果期后应提高 K 和 P 的投入, 控制 N、Mg 和 S 的投入。从节水、节肥和保护环境角度出发, 基质栽培应着力发展封闭式供液方式。

关键词: 基质栽培; 开放式; 封闭式; 电导率; 离子组成; 养分利用效率

中图分类号: S317 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)02-0224-08

Effect of Culture Systems on Salt Accumulation in Substrate and Nutrient Use Efficiency of Tomato

XIONG Jing^{1,2} CHEN Qing¹ WANG Jingguo¹ LIU Wei²

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China

2. Beijing Vegetable Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

Abstract: One of the problems that exists in substrate culture is salt accumulation in root zone, and adequate management of nutrient solution is the primary method to control it. In order to achieve scientific management of nutrient solution, salt accumulation characteristics in root zone need to be studied. A greenhouse experiment was carried out to determine the influence of two systems (open and closed) on electrical conductivity, ion constitution of root solution, nutrient uptake, yield and fruit quality of tomato and nutrient use efficiency. Results showed that electrical conductivity of root solution was increased with the growth of tomato, the highest electrical conductivity in open and closed systems were 11.9 mS/cm and 17.2 mS/cm, respectively. The salt ions in root zone of the two systems were mainly NO_3^- , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} and H_2PO_4^- . The ion imbalance was found in both the open and closed systems, ratios of K^+ , Ca^{2+} and H_2PO_4^- concentrations to total ion concentration were decreased from the initial while the ratios of Mg^{2+} , NO_3^- and SO_4^{2-} were increased. The yield of tomato was decreased with high electrical conductivity in open and closed systems, while the blossom-end rot (BER) of fruit was increased with high electrical conductivity and ion imbalance degree. At the end of the trial, the BER in open and closed systems were 29.7% and 36.6%, respectively. Compared with open system, closed system improved the nutrient use efficiency, the nutrient use efficiencies of N, P, K, Ca, Mg and S were increased by 11.6%, 19.6%, 18.9%, 11.8%, 37.3% and 15.9%, respectively. In conclusion, the salt accumulation and ion imbalance existed in open and closed systems. Increasing the

收稿日期: 2016-09-26 修回日期: 2016-11-24

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2013AA103004)和北京市果类蔬菜产业创新团队项目(BAIC01-2016)

作者简介: 熊静(1987—), 女, 博士生, 主要从事设施栽培养分管理研究, E-mail: xjhappy.happy@163.com

通信作者: 刘伟(1971—), 女, 研究员, 博士, 主要从事设施园艺与无土栽培研究, E-mail: liuwei@nervc.org

input of K and P while controlling the use of Mg, N and S could help to keep the ion balance of root solution. The closed system was a more promising way to realize environment-friendly, water-saving and fertilizer-saving in substrate culture.

Key words: substrate culture; open system; closed system; electrical conductivity; ion composition; nutrient use efficiency

引言

与土壤栽培相比,基质栽培可供作物根系生长的有效体积为 $10 \sim 15 \text{ L/m}^2$,有限的栽培环境使得系统中可利用的水分和养分含量较低,仅为作物所需水肥总量的 $2\% \sim 5\%$ [1]。为保证作物的正常生长,充足的水肥供应极为重要。基质栽培中水肥(营养液)的供应方式为开放式和封闭式。开放式是指回流液直接排出不再循环利用。实际生产中该方式使得 $20\% \sim 80\%$ 的水肥被排出进入外界环境 [2],造成资源的极大浪费和环境污染 [3-5]。封闭式是指回流液被循环使用。该供液方式具有环境污染小、水肥利用效率高优势 [6]。在实际生产中,因作物水肥吸收量会随气象因素、作物生长速率和生育期的改变而改变,使得 2 种供液方式中均存在根区环境电导率高、养分离子比例失衡等问题 [7-10],封闭式因回流液的循环使用使得该问题更为严重 [11]。

电导率过高会导致作物产量降低、养分吸收受到抑制,当电导率大于 6 mS/cm 时,作物产量显著降低,降幅可达 50% [12]。养分离子比例失衡会产生离子拮抗,导致某些养分缺失,如 K - Ca 拮抗、Ca - Mg 拮抗、 NO_3^- 对 Ca 吸收转运的抑制等 [13-15]。在蔬菜种植过程中,养分缺失易导致蔬菜出现各种病症,如番茄和甜椒的脐腐病、茄子内部腐烂、结球莴苣和大白菜的干烧心、芹菜的黑心病等 [16-17]。

为减缓根区盐分累积和养分离子比例失衡,需定期对营养液管理措施和配方进行调整。营养液管理措施与配方的调整由根区养分组成情况、作物生长阶段、气象条件等诸多因素共同决定。目前,我国基质栽培因相关基础研究不足,导致营养液管理粗放,使得基质栽培出现栽培周期短、产量和品质低等问题。为实现营养液管理与栽培系统实际情况的有

机结合,提升我国基质栽培水平,了解不同供液方式下作物养分吸收规律和根区盐分累积特征是实现营养液科学管理的重要前提。本文对不同供液方式下根区电导率、盐分离子组成与比例变化特征、作物养分吸收规律等进行系统研究,以期为实现基质栽培营养液科学管理提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 温室概况

试验于 2014 年 9 月—2015 年 5 月在北京市农林科学院蔬菜研究中心玻璃温室内进行。试验期间温室内温度和光照强度如图 1 所示, CO_2 平均摩尔比为 $432 \mu\text{mol/mol}$,平均空气相对湿度为 62.8% 。

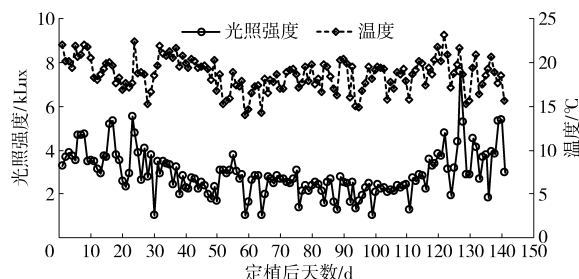


图 1 试验期间温室内光照和温度情况

Fig. 1 Light intensity and temperature in greenhouse

1.2 供试材料

栽培基质为椰糠,购于荷兰捷菲公司。供试作物为番茄,品种为佳丽 14,果实类型为硬皮中果型,购于荷兰瑞克斯旺公司。于 2014 年 9 月 1 日进行穴盘播种,22 d 苗龄时选取长势一致的秧苗移栽至椰糠育苗块上,2014 年 10 月 11 日定植。

1.3 试验设计

试验设 2 种营养液供液方式:开放式 (Open system, OS) 和封闭式 (Closed system, CS),不同供液方式结构示意图如图 2 所示。整个生育期内开放式与封闭式处理植株浇液总量一致,通过浇液时间和

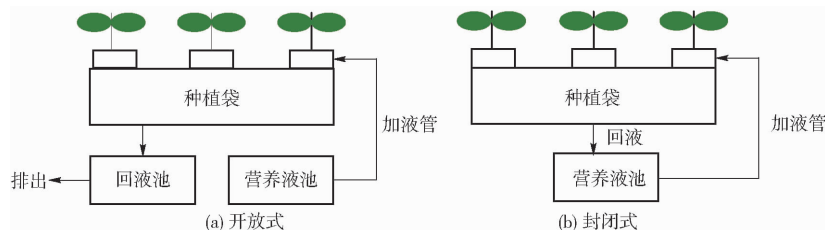


图 2 不同供液方式示意图

Fig. 2 Designs of different culture systems

流量计控制浇液量。每次浇液 20 min,坐果前每天浇液 2 次,坐果后每天浇液 4 次。营养液灌溉方式为滴灌。每个处理设 3 次重复,随机区组排列,每个小区 10 个种植袋,种植袋尺寸为 100 cm × 20 cm × 10 cm,每个种植袋中种植 3 株番茄,种植密度为 2.4 株/m²。

开放式与封闭式处理采用相同的营养液配方。配方引自荷兰番茄基础配方,大量元素配方(均为摩尔浓度)为 NO₃⁻ 10.75 mmol/L、NH₄⁺ 1.0 mmol/L、H₂PO₄⁻ 1.25 mmol/L、K⁺ 6.5 mmol/L、Ca²⁺ 2.75 mmol/L、Mg²⁺ 1.0 mmol/L、SO₄²⁻ 1.5 mmol/L,微量元素配方为 Fe 14.7 μmol/L、Mn 27.8 μmol/L、Cu 0.8 μmol/L、Zn 6.7 μmol/L、B 4.2 μmol/L、Mo 0.07 μmol/L。水源为净化后的地下水,电导率 0.1 mS/cm, pH 值 7.2。试验期内,开放式与封闭式营养液配制次数分别为 19 次和 13 次(封闭式系统因回流液循环使用节约了营养液用量)。每次配制完成后测定营养液电导率和 pH 值(图 3),并记录水肥投入量。

为研究基质盐分累积情况,种植过程中没有对基质进行冲洗。

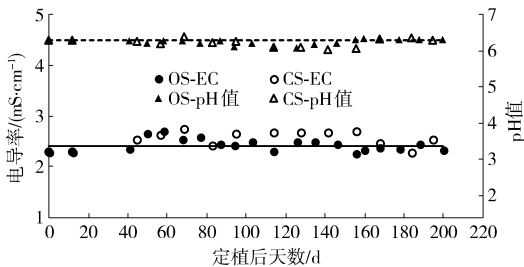


图3 生育期不同处理新鲜营养液电导率(EC)和 pH 值
Fig.3 Electrical conductivity and pH value of fresh nutrient solution in different systems

1.4 植株生长管理

番茄采取单杆整枝,定期进行整枝、打叉、去老叶和落秧。

1.5 测定指标与方法

1.5.1 营养液和根区溶液采集与分析

番茄定植后 21 d 起,每 14 d 进行一次营养液和根区溶液的采集,根区溶液采用陶土土土壤溶液提取器采集。每次分别采集营养液和根区溶液各 100 mL,将其过滤后放入 2℃ 冰箱内保存,后期进行电导率和盐分离子的测定。溶液中 NO₃⁻ 采用连续流动分析仪(AutoAnalyzer 3 型,德国 SEAL 公司)测定,H₂PO₄⁻、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 和 SO₄²⁻ 采用电感耦合等离子体发射光谱仪 ICP(ICPE-9000 型,日本岛津公司)测定。

1.5.2 植株养分含量测定

在番茄定植初期(定植后 17 d)、花期(定植后 37 d)、坐果初期(定植后 63 d)、采收初期(定植后 107 d)、采收后期(定植后 178 d)和试验结束时分别采集一株完整植株,将其按茎干、叶片和果实进行分类,随后放入干燥箱于 105℃ 杀青 30 min,75℃ 干燥至质量恒定,并记录其质量。干样粉碎后进行养分含量的测定。植株 N 由浓 H₂SO₄-H₂O₂ 消解后,采用连续流动分析仪(AutoAnalyzer 3 型,德国 SEAL 公司)测定;P、K、Ca 和 Mg 由浓 H₂SO₄-浓 HNO₃-HClO₄ 消解后,采用电感耦合等离子体发射光谱仪 ICP(ICPE-9000 型,日本岛津公司)测定;S 经浓 HNO₃ 微波消解后,采用电感耦合等离子体发射光谱仪 ICP 测定^[18]。

1.5.3 番茄产量及脐腐病测定

果实完全转红后 3~5 d 进行采收,每个小区中 24 株植株成熟果实均计入产量数据。同时,记录每穗果中好果数和脐腐病病果数。

1.6 统计分析方法

数据采用 Microsoft Excel 2013 软件进行录入、整理和制图,采用 *t* 检验进行差异显著性分析($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 电导率

整个生育期内,开放式营养液电导率一直维持在 2.4 mS/cm 左右,封闭式营养液电导率随生育期延长不断上升,二者之间差异达到显著水平(图 4)。开放式和封闭式根区溶液电导率均随生育期的延长而上升,最高值分别达到 11.9 mS/cm 和 17.2 mS/cm。定植初期,开放式根区溶液电导率大于封闭式;从定植后 121 d 起,封闭式高于开放式,并达到差异显著水平。由此得知,随生育期的延长基质栽培根区盐分累积量不断增加,封闭式中回流液的循环使用会加重根区盐分累积。

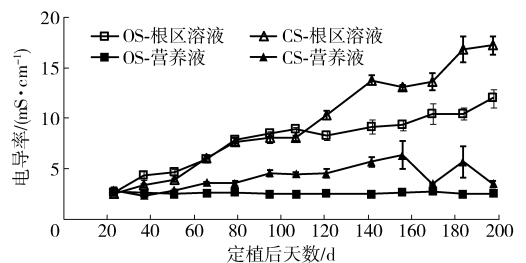


图4 不同供液方式下营养液和根区溶液电导率的变化特征

Fig.4 Change of electrical conductivity in nutrient solution and root solution in different systems

2.2 盐离子浓度与比例

2.2.1 离子浓度

随定植时间的延长,开放式营养液 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 $H_2PO_4^-$ 浓度均保持在一个相对稳定的水平,封闭式则不断增加(图 5)。根区溶液中,开放式和封闭式 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 $H_2PO_4^-$ 浓度均随定植时间的延长不断增加。与定植初期相比,采收后期开放式中 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、

NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 $H_2PO_4^-$ 浓度分别上升 37.1、16.1、17.4、71.7、11.5、3.0 mmol/L,封闭式分别上升 56.3、27.7、23.7、110.7、17.8、7.4 mmol/L。由各离子的浓度可看出,开放式和封闭式中各离子对根区盐分累积强度的贡献率由大到小均表现为: NO_3^- 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 $H_2PO_4^-$;由各离子的增加量可看出,封闭式根区溶液中各离子累积强度均高于开放式。

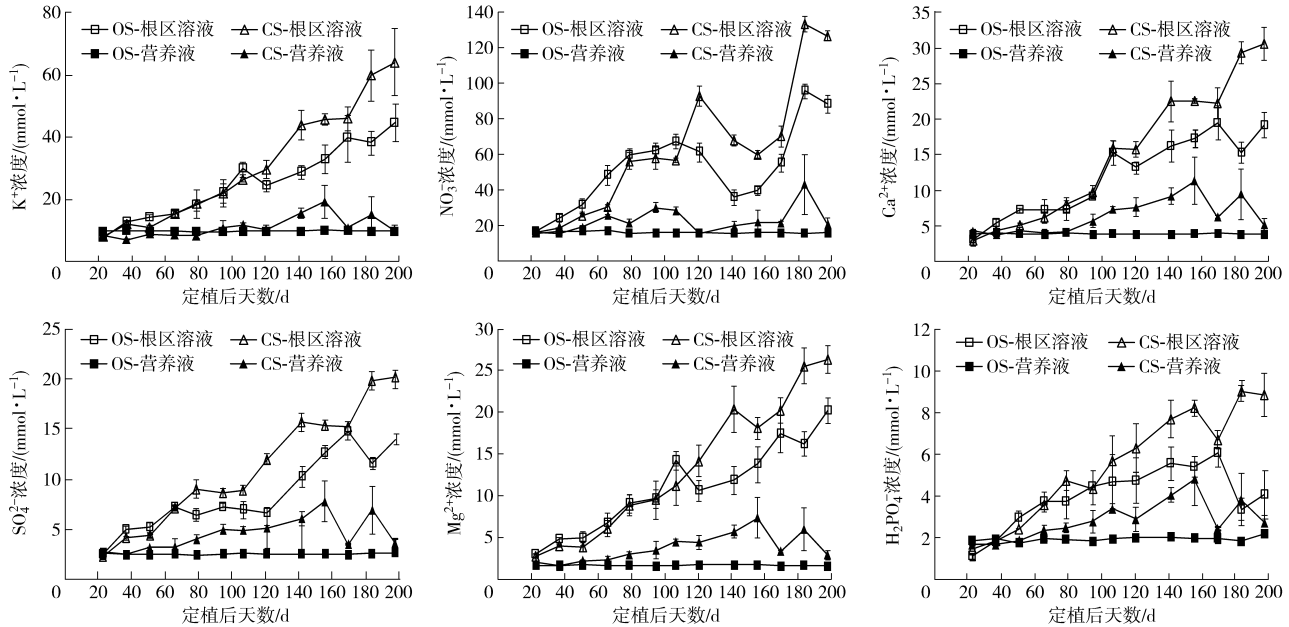


图 5 不同供液方式下营养液和根区溶液盐分离子浓度变化特征

Fig.5 Changes of salt ion concentration in nutrient solution and root solution in different systems

2.2.2 离子比例

整个试验期内,开放式营养液各离子比例均保持在一个稳定的水平;封闭式营养液中 K^+ 比例则比初期配制时降低 5.8%, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 $H_2PO_4^-$ 比例分别增加 1.3%、2.4%、0.5%、1.5% 和 0.1%,并与开放式营养液差异达到显著水平(表 1)。与定植时配制的营养液相比,开放式根区溶液中 K^+ 、 Ca^{2+} 和 $H_2PO_4^-$ 在总离子浓度中的比例分别降低 5.2%、0.5% 和 1.8%, Mg^{2+} 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 比例分别增加 5.0%、2.0% 和 0.5%;封闭式根区溶液中 K^+ 、 Ca^{2+} 和 $H_2PO_4^-$ 比例分别降低 5.0%、0.5% 和 1.4%, Mg^{2+} 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 比例分

别增加 4.8%、1.1% 和 1.0%。综合开放式和封闭式营养液与根区溶液离子比例变化情况可看出,回流液的循环使用会导致封闭式营养液离子比例的失衡,番茄养分吸收则会导致根区溶液离子比例失衡。

2.3 番茄养分吸收

随生育期的推进,不同供液方式下番茄叶片各养分含量(质量比)变化特征均为:N 含量不断降低;K 和 Ca 含量在进入果实膨大期后迅速上升,采收后期保持稳定;S 含量不断增加;P 和 Mg 含量变化较小(图 6)。进入坐果期后,不同处理间叶片 N、K 和 Ca 含量表现为封闭式比开放式分别降低 0.4、

表 1 营养液与根区溶液中各离子在总离子浓度中的比例变化特征

Tab.1 Ratio of each ion concentration to total ion concentration in nutrient solution and root solution %

溶液类型	处理	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	NO_3^-	SO_4^{2-}	$H_2PO_4^-$
营养液	开放式	27.4 ^a	10.9 ^b	4.4 ^b	44.6 ^a	7.2 ^b	5.5 ^a
	封闭式	21.6 ^b	12.2 ^a	6.8 ^a	45.1 ^a	8.7 ^a	5.6 ^a
根区溶液	开放式	22.2 ^a	10.4 ^a	9.4 ^a	46.6 ^a	7.7 ^a	3.7 ^a
	封闭式	22.4 ^a	10.4 ^a	9.2 ^a	45.7 ^a	8.2 ^a	4.1 ^a

注:数值为整个试验期内 13 次取样样品的均值。同列数值后不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$),下同。

2.0、3.8 mg/g, P、Mg 和 S 含量基本相当。随生育期的延长,开放式和封闭式果实 N、P 含量逐渐降低, K 含量逐渐上升, Ca、Mg 和 S 含量先增加后降低(图 6)。进入坐果期后,封闭式果实 N、Ca 和 Mg 含

量比开放式分别降低 2.3、0.2、0.05 mg/g, P、K 和 S 含量基本相当。从不同供液方式下叶片和果实养分含量的差异可看出,封闭式番茄叶片和果实养分吸收和转运的抑制现象更为严重。

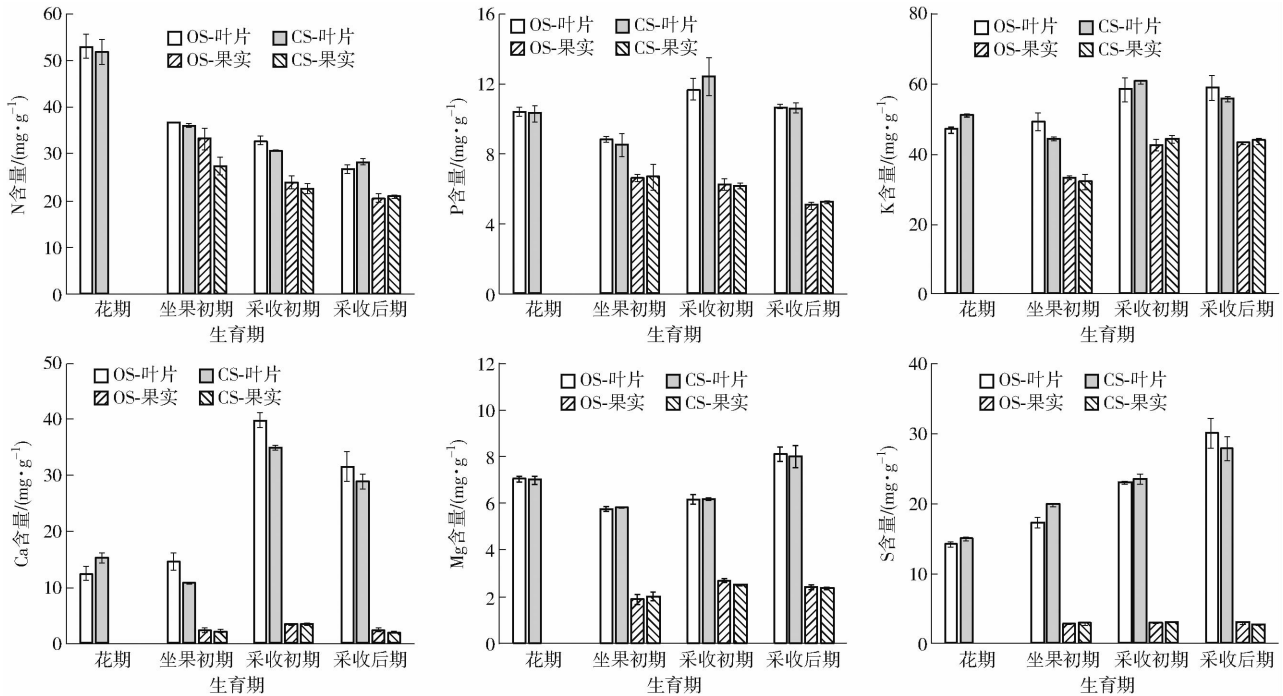


图 6 不同供液方式下番茄叶片与果实养分吸收特征

Fig. 6 Nutrient uptake characteristics of tomato in different systems

2.4 产量与脐腐病患病率

随果穗数的增长,开放式和封闭式番茄单穗果产量变化趋势为先增加后降低(表 2)。2 种供液方式均于第 2 穗果获得最高产量,随后逐渐降低,到第 7 穗果时,产量仅为第 2 穗果的 50% 左右。同时,开

放式和封闭式分别于第 2、3 穗果开始出现脐腐病症状;脐腐病患病率均随生育期的延长不断增加,到采收后期,开放式和封闭式脐腐病患病率分别达到 29.7% 和 36.6%。由此可见,较高的电导率和离子比例失衡会导致果实产量和品质下降。

表 2 不同供液方式下番茄产量与脐腐病患病率变化特征

Tab. 2 Change of yield and blossom-end rot in different systems

参数	处理	第 1 穗	第 2 穗	第 3 穗	第 4 穗	第 5 穗	第 6 穗	第 7 穗	第 8 ~ 13 穗
产量/(kg·hm ⁻²)	开放式	7 750 ^a	9 495 ^a	8 025 ^a	7 833 ^a	7 390 ^a	5 887 ^a	4 870 ^a	30 943 ^a
	封闭式	8 277 ^a	9 893 ^a	7 684 ^a	7 987 ^a	6 827 ^a	5 223 ^a	5 250 ^a	33 753 ^a
脐腐病患病率/%	开放式		0.5 ^a	0.3 ^a	1.1 ^a	1.5 ^a	3.9 ^a	11.3 ^a	29.7 ^a
	封闭式			2.3 ^a	2.1 ^a	1.5 ^a	4.9 ^a	8.1 ^a	36.6 ^a

2.5 番茄养分利用率

整个生育期内,开放式因回流液未循环使用,每公顷 N、P、K、Ca、Mg 和 S 投入量分别比封闭式高出 276.9、66.4、449.6、192.1、46.7、77.9 kg,不同供液方式养分投入量达到差异显著水平(表 3)。2 种供液方式下番茄各器官养分含量、养分带走量和产量基本相当(图 6、表 2、表 3),但封闭式中各养分利用率均显著高于开放式, N、P、K、Ca、Mg 和 S 利用率分别提高 11.6%、19.6%、18.9%、11.8%、37.3% 和 15.9%。可见,封闭式栽培更易实现基质栽培的节

水、节肥与环境友好型发展。

3 讨论

3.1 供液方式对盐分累积的影响

根区溶液电导率会随作物水分需求量的改变而改变^[7-8],离子比例则会因营养液养分供应和作物养分吸收的不完全一致而失衡^[9-10]。本研究中,开放式和封闭式的供液方式下根区溶液电导率均随生育期的延长不断上升,并均于定植后 66 d 达到盐分胁迫临界值(6 mS/cm)^[12]。封闭式中因回流液的

表 3 不同供液方式下番茄养分利用率

Tab. 3 Nutrient use efficiency of tomato in different systems

参数	处理	N	P	K	Ca	Mg	S
养分投入量/(kg·hm ⁻²)	开放式	837.7 ^a	187.2 ^a	1298.9 ^a	541.4 ^a	115.6 ^a	236.8 ^a
	封闭式	560.8 ^b	120.8 ^b	849.3 ^b	349.3 ^b	68.8 ^b	158.9 ^b
植株带走量/(kg·hm ⁻²)	开放式	183.4 ^a	56.0 ^a	384.5 ^a	84.4 ^a	31.8 ^a	52.3 ^a
	封闭式	187.3 ^a	59.8 ^a	411.8 ^a	95.2 ^a	44.7 ^a	60.6 ^a
养分利用率/%	开放式	21.7 ^b	29.8 ^b	29.5 ^b	15.5 ^b	27.5 ^b	22.1 ^b
	封闭式	33.3 ^a	49.4 ^a	48.4 ^a	27.3 ^a	64.8 ^a	38.0 ^a

循环使用,其根区溶液电导率从定植后 121 d 起高于开放式,并达到差异显著水平。导致 2 种供液方式中根区溶液电导率上升的主要离子为 K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、NO₃⁻、SO₄²⁻ 和 H₂PO₄⁻,贡献率由大到小表现为 NO₃⁻、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻、H₂PO₄⁻,该结果与 KO 等^[8]和 AHN 等^[19]的研究结果一致。开放式营养液因无回流液的进入其离子比例维持在一个相对稳定的水平,根区溶液则因番茄对养分的选择性吸收而存在离子比例失衡现象;封闭式中因回流液的使用和番茄对养分的选择性吸收,其营养液和根区溶液均存在着离子比例失衡现象。但封闭式中根区溶液离子比例失衡程度并未因营养液离子比例的失衡而进一步加深,导致该现象的原因可能是:①营养液养分含量充足,到后期各养分含量远高于番茄所需养分,导致养分吸收对根区离子比例的变化影响较小。②试验期内根区电导率均远高于 6 mS/cm,其对番茄形成的渗透胁迫要强于离子拮抗导致的养分吸收障碍^[20]。

3.2 盐分累积与番茄水肥需求特征的相关关系

基质栽培根区逆境胁迫包括盐离子浓度(电导率)上升和离子比例失衡,这 2 个方面主要受到作物水肥需求特征的影响^[21]。番茄水肥需求特征均为随生育期的推进不断上升,果实膨大期和采收初期达到最高峰,随后需水量缓慢降低,需肥量则迅速降低^[22-23]。本研究中,在番茄坐果初期(定植后 37~66 d)、果实膨大期—采收初期(定植后 66~107 d)、采收中期(定植后 107~170 d)与采收后期(定植后 170~198 d)开放式根区溶液电导率增幅分别为 1.6、3.0、1.6、1.5 mS/cm,果实膨大期—采收初期增幅最大,其他时期相当;封闭式根区溶液电导率在以上几个生育阶段的增幅分别为 2.7、2.0、5.6、3.6 mS/cm,果实膨大期—采收初期增幅最小,采收中期增幅最大。由此可见,开放式根区溶液电导率的变化主要受番茄需水特征的影响,封闭式则主要受番茄养分吸收特征的影响,需水特征次之。2 种供液方式下根区溶液离子比例则均受到养分吸收特征的影响。本研究中,番茄养分含量表现为随

生育期的延长 N 含量不断降低,K、Ca 和 S 含量不断升高,P 和 Mg 含量变化较小;根区溶液离子比例表现为 K⁺、Ca²⁺ 和 H₂PO₄⁻ 所占比例降低,Mg²⁺、NO₃⁻ 和 SO₄²⁻ 比例上升。除 P 和 S 外,其他养分在根区溶液中的比例变化特征与植株含量变化特征吻合。导致 P 和 S 不够吻合的原因可能是该番茄品种对 P 和 S 的吸收规律与配方中 P 和 S 含量设置不一致。

3.3 盐分累积对 Ca 吸收的影响

番茄果实脐腐病是逆境胁迫的明显特征,是典型的缺 Ca 反应^[24]。Ca 被番茄根系吸收后,短距离运输进入木质部,再以蒸腾作用为动力进行长距离运输进入各个器官。因果实蒸腾作用小,自身易发生缺 Ca 现象^[25],而高电导率会导致蒸腾作用的降低^[26-27],进一步加剧果实 Ca 的缺失。另一方面,当根区环境 N 含量过高时,大量 Ca 会进入叶片,使得叶片与果实发生争 Ca 现象^[28-29]。本研究中根区溶液 NO₃⁻ 随生育期的延长不断增加,到后期时达到 87.7~126.3 mmol/L,较高的 NO₃⁻ 使得从坐果初期后叶片 Ca 含量急剧上升,上升幅度为 17.0~18.2 mg/g,而其在果实中的含量降低了 0.2 mg/g,最终导致脐腐病患率率的增加。

3.4 开放式和封闭式栽培的综合效益评价

从盐分累积强度和番茄品质角度出发,基质栽培更适宜发展开放式的供液方式,但该方式易造成水肥资源的浪费和农业环境的污染^[3-5]。在相似的种植环境中,与封闭式相比,开放式每年每公顷约造成 2 123~10 000 m³ 的灌溉水和 1.5 t 的 N 损失,并将其排入环境中造成水体的污染^[30-31]。而封闭式不仅可节约水肥资源,还可能实现产量的小幅上升^[32-33]。本研究中,开放式和封闭式番茄产量分别为 82 194 kg/hm² 和 84 894 kg/hm²。与开放式相比,封闭式产量提高了 2 670 kg/hm²,但每公顷 N、P、K、Ca、Mg 和 S 养分投入量则分别降低了 276.9、66.4、449.6、192.1、46.7、77.9 kg,灌溉水投入量降低了 993.6 m³。虽然封闭式供液方式下番茄脐腐病患率高于开放式,但综合产量、水肥投入量等多方面因素考虑,封闭式更能实现番茄基质栽培的节水、节肥

和环境友好型发展。

3.5 番茄基质栽培营养液管理建议

综合分析,开放式在番茄进入坐果期后应提高营养液浇液频率来为番茄提供充足的水分,减缓根区盐分的累积;封闭式则需在进入采收期后采取该措施。同时,还应采取定期冲洗根区的方式来进一步控制盐分累积。综合根区电导率变化特征、番茄基质栽培根区环境最适电导率(4 mS/cm)^[21]和盐分胁迫临界电导率^[12]3个因素考虑,从定植后60 d起开放式和封闭式均需使用低浓度(1/2标准营养液浓度)营养液对根区进行冲洗。开放式的冲洗频率为每14 d冲洗一次;封闭式则为坐果期—果实膨大期每14 d冲洗一次,进入采收期后每7 d冲洗一次。用该配方种植番茄时,为控制根区离子比例失衡和果实缺Ca现象,在番茄进入坐果期后应提高K和P的投入,控制N、Mg和S的投入。

4 结论

(1)开放式和封闭式供液方式下,基质栽培根区均存在盐分累积和离子比例失衡现象。盐分累积强度随生育期的延长不断增加,且封闭式的增幅要高于开放式;开放式和封闭式根区溶液离子比例失衡特征与程度相当,均表现为 K^+ 、 Ca^{2+} 和 $H_2PO_4^-$ 比例降低, Mg^{2+} 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 比例上升。

(2)盐分累积会导致番茄产量降低与果实脐腐病患病率增加。随电导率的增加,开放式单穗果产量由7 750 kg/hm²降至4 870 kg/hm²,封闭式由8 277 kg/hm²降至5 250 kg/hm²;到采收后期开放式和封闭式果实脐腐病患病率分别高达29.7%和36.6%。

(3)与开放式相比,封闭式栽培更能实现番茄基质栽培的节水、节肥和环境友好型发展。

参 考 文 献

- 1 VOOGT W. Fertilization of protected crops [R]. Stanley Delegation Wageningen, 2016.
- 2 GREWAL S H, MAHESHWARI B, PARKS S E. Water and nutrient use efficiency of a low-cost hydroponic greenhouse for a cucumber crop: an Australian case study [J/OL]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98 (5): 841 - 846. <http://www.sciencedirect.com/science/journal/03783774>. DOI: 10.1016/j.agwat.2010.12.010.
- 3 VOOGT W, SONNEVELD C. Nutrient management in closed growing systems for greenhouse production [M]. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1997: 83 - 102.
- 4 VAN O S, ERIK A. Closed soilless growing systems: a sustainable solution for Dutch greenhouse horticulture [J/OL]. *Water Science and Technology*, 1999, 39 (5): 105 - 112. <http://www.sciencedirect.com/science/journal/02731223>. DOI: 10.1016/S0273-1223(99)00091-8.
- 5 ROUPHAEL Y, COLLA G, BATTISTELLI A, et al. Yield, water requirement, nutrient uptake and fruit quality of zucchini squash grown in soil and soilless culture [J/OL]. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 2004, 79 (3): 423 - 430. <http://www.jhortscib.com/index.htm>. DOI: 10.1080/14620316.2004.11511784.
- 6 GIUFFRIDA F, LEONARDI C. Nutrient solution concentration on pepper grown in a soilless closed system: yield, fruit quality, water and nutrient efficiency [J/OL]. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil & Plant Science*, 2012, 62 (1): 1 - 6. <http://china.tandfonline.com/toc/sagb20/current>. DOI: 10.1080/09064710.2011.560123.
- 7 SAVVAS D, MANOS G. Automated composition control of nutrient solution in closed soilless culture systems [J/OL]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1999, 73 (1): 29 - 33. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021863498903894>. DOI: 10.1006/jaer.1998.0389.
- 8 KO M T, AHN T I, SON J E. Comparisons of ion balance, fruit yield, water and fertilizer use efficiencies in open and closed soilless culture of paprika (*Capsicum annuum* L.) [J/OL]. *Korean Journal of Horticultural Science & Technology*, 2013, 31 (4): 423 - 428. http://ocean.kisti.re.kr/IS_mvpopo001P.do?method=multEMain&poid=ksks&sFree=. DOI: 10.7235/hort.2013.13028.
- 9 李亚灵, STANGHELLIN C. 温室內蒸腾控制对高盐分下番茄生产的影响 [J]. *农业工程学报*, 2001, 17 (6): 85 - 89. LI Yaling, STANGHELLIN C. Effect of transpiration control under high salinity in a greenhouse on tomato yield [J]. *Transactions of the CSAE*, 2001, 17 (6): 85 - 89. (in Chinese)
- 10 SAVVAS D, GIZAS G. Response of hydroponically grown gerbera to nutrient solution recycling and different nutrient cation ratios [J/OL]. *Scientia Horticulturae*, 2002, 96 (1 - 4): 267 - 280. <http://www.sciencedirect.com/science/journal/03044238>. DOI: 10.1016/S0304-4238(02)00054-7.
- 11 SAVVAS D, MANTZOS N, BAROUCHAS P E, et al. Modelling salt accumulation by a bean crop grown in a closed hydroponic system in relation to water uptake [J/OL]. *Scientia Horticulturae*, 2007, 111 (4): 311 - 318. <http://www.sciencedirect.com/science/journal/03044238>. DOI: 10.1016/j.scienta.2006.10.033.
- 12 SCHWARZ D, KUCHENBUCH R. Water uptake by tomato plants grown in closed hydroponic systems dependent on the EC-level [J/OL]. *Acta Horticulturae*, 1998, 458: 323 - 328. <http://www.actahort.org>. DOI: 10.17660/ActaHortic.1998.458.41.
- 13 SONNEVELD C, VOOGT W. Growth and cation absorption of some fruit-vegetable crops grown on rockwool as affected by different cation ratios in the nutrient solution [J/OL]. *Journal of Plant Nutrition*, 1985, 8 (7): 585 - 602. <http://china.tandfonline.com/toc/lpla20/current>. DOI: 10.1080/01904168509363370.

- 14 VOOGT W, SONNEVELD C. Interactions between nitrate (NO_3) and chloride (Cl) in nutrient solution for substrate [J/OL]. *Acta Horticulturae*, 2004, 644: 359 – 368. <http://www.actahort.org>. DOI: 10.17660/ActaHortic. 2004. 644. 48.
- 15 LI Y Q, QIN J, MATTSON S N, et al. Effect of potassium application on celery growth and cation uptake under different calcium and magnesium levels in substrate culture [J/OL]. *Scientia Horticulturae*, 2013, 158: 33 – 38. <http://www.sciencedirect.com/science/journal/03044238>. DOI: 10.1016/j.scienta. 2013. 04. 025.
- 16 NAVARRO J M, GARRIDO C, CARVAJAL M, et al. Yield and fruit quality of pepper plants under sulphate and chloride salinity [J/OL]. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 2002, 77(1): 52 – 57. <http://www.jhortscib.com/index.htm>. DOI: 10.1080/14620316. 2002. 11511456.
- 17 SAVVAS D, LENZ F. Influence of NaCl concentration in the nutrient solution on mineral composition of eggplants grown in sand culture [J]. *Journal of Applied Botany*, 1996, 70: 124 – 127.
- 18 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- 19 AHN T I, SON J E. Changes in ion balance and individual ionic contributions to EC reading at different renewal intervals of nutrient solution under EC- based nutrient control in close-loop soilless culture for sweet peppers (*Capsicum annuum* L. *Fiesta*) [J]. *Korean Journal of Horticultural Science & Technology*, 2011, 29(1): 29 – 35.
- 20 LEON B, FRANCOIS L E, CLARK R A. Interactive effects of salinity and fertility on yields of grains and vegetables [J]. *Agronomy Journal*, 1973, 66(3): 412 – 421.
- 21 SONNEVELD C, VOOGT W. Plant nutrition of greenhouse crops [M]. London: Springer Dordrecht Heidelberg, 2009.
- 22 刘浩, 孙景生, 王聪聪, 等. 温室番茄需水特性及影响因素分析[J]. *节水灌溉*, 2011(4): 11 – 14.
LIU Hao, SUN Jingsheng, WANG Congcong, et al. Analysis of water requirement characteristic and influencing factors of greenhouse [J]. *Water Saving Irrigation*, 2011(4): 11 – 14. (in Chinese)
- 23 刘军, 高丽红, 黄延楠. 两个番茄品种日光温室栽培养分吸收规律[J]. *中国蔬菜*, 2005(4): 12 – 14.
LIU Jun, GAO Lihong, HUANG Yannan. Study on nutrient absorption of two tomato varieties in solar greenhouse [J]. *China Vegetables*, 2005(4): 12 – 14. (in Chinese)
- 24 SAURE M C. Blossom-end rot of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.)—a calcium- or a stress-related disorder [J/OL]. *Scientia Horticulturae*, 2001, 90(3): 193 – 208. <http://www.sciencedirect.com/science/journal/03044238>. DOI: 10.1016/S0304-4238(01)00227-8.
- 25 WHITE P J, BROADLEY M R. Calcium in plants [J]. *Annals of Botany*, 2003, 92(4): 487 – 511.
- 26 鲁少尉, 齐飞, 李天来. NaCl 及等渗 PEG 胁迫对番茄叶片光合特性及蔗糖代谢的影响 [J/OL]. *华北农学报*, 2012, 27(3): 136 – 141. http://www.hbxb.net/CN/volumn/volumn_1144.shtml. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7091. 2012. 03. 027.
LU Shaowei, QI Fei, LI Tianlai. Effect of NaCl and PEG iso-osmotic stresses on photosynthetic characteristics and sucrose metabolizing in tomato leaf [J/OL]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2012, 27(3): 136 – 141. (in Chinese)
- 27 王振华, 裴磊, 郑旭荣, 等. 盐碱地滴灌春小麦光合特性与耐盐指标研究 [J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(4): 65 – 72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160410&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298. 2016. 04. 010.
WANG Zhenhua, PEI Lei, ZHENG Xurong, et al. Photosynthetic characteristics and salt-tolerance indexes of spring wheat with drip irrigation in saline-alkali soils [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(4): 65 – 72. (in Chinese)
- 28 周卫, 汪洪. 植物钙吸收、转运及代谢的生理和分子机制 [J]. *植物学通报*, 2007, 24(6): 762 – 778.
ZHOU Wei, WANG Hong. The physiological and molecular mechanisms of calcium uptake, transport, and metabolism in plants [J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2007, 24(6): 762 – 778. (in Chinese)
- 29 HIRSCHI K D. The calcium conundrum, both versatile nutrient and specific signal [J/OL]. *Plant Physiology*, 2004, 136: 2438 – 2442. <http://www.plantphysiol.org/content/136/1/2438.full.pdf+html?sid=3cc73853-0a9f-4e9d-9f7a-7c67a06fd9a9>. DOI: 10.1104/pp.104.046490.
- 30 MALORGIO F, SCACCO M, TOGNONI F, et al. Effect of nutrient concentration and water regime on cut rose production grown in hydroponic system [J/OL]. *Acta Horticulturae*, 2001, 559: 313 – 318. <http://www.actahort.org>. DOI: 10.17660/ActaHortic. 2001. 559. 46.
- 31 MICHAEL R, HEINRICH J L. Soilless culture: theory and practice [M]. Burlington: Elsevier Press, 2009.
- 32 KO M T, AHN T I, CHO Y Y, et al. Uptake of nutrients and water by paprika (*Capsicum annuum* L.) as affected by renewal period of recycled nutrient solution in closed soilless culture [J/OL]. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 2013, 54(5): 412 – 421. <http://link.springer.com/article/10.1007/s13580-013-0068-0>. DOI: 10.1007/s13580-013-0068-0.
- 33 INCROCCI L, INCROCCI G, DIARA C, et al. Report on Italy test site [R]. EUPHOROS Project Report, www.euphoros.wur.nl. 2001.