

设施番茄营养液调控技术研究现状与展望

孙茜^{1,2,3}, 王湛¹, 徐凡³, 郭文忠³, 姚宇升², 李灵芝⁴, 王保明⁴

(1. 宁夏农林科学院固原分院 宁夏固原 756000; 2. 神农富通(山西)农业规划设计研究有限公司 太原 030006;
3. 北京农业智能装备技术研究中心 北京 100097; 4. 山西农业大学 山西太谷 030801)

摘要:近年来我国持续加快推进农业现代化建设以提升农业生产能力和生产水平,设施农业是农业现代化的重要形式,也是衡量一个国家或地区农业现代化水平的重要标志。在设施农业中,基质栽培由于水肥管理高效,节水节肥效果明显,且可有效防止土传病害发生,已成为设施番茄工厂化生产的重要手段。营养液的调控是设施番茄工厂化基质栽培的重点和难点,针对营养液调控,研究者已开展了营养液灌溉浓度、营养液配方、营养液灌溉频率等方面的探究,初步揭示了设施番茄工厂化基质栽培营养液调控机制,但依然还存在着营养液灌溉较为粗放、灌溉根区盐分积累严重等问题。综述了设施番茄工厂化基质栽培营养液调控的现状,概括了营养液调控中的一些方法,分析了营养液调控方面存在的问题和不足,探讨了今后的发展趋势。

关键词:设施番茄;基质栽培;营养液调控;数字农业

中图分类号:S641.2 文献标志码:A 文章编号:1673-2871(2023)04-012-07

Research status and future prospect of nutrient solution control in tomato facility cultivation

SUN Qian^{1,2,3}, WANG Zhan¹, XU Fan³, GUO Wenzhong³, YAO Yusheng², LI Lingzhi⁴, WANG Baoming⁴

(1. Guyuan Branch, Ningxia Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Guyuan 756000, Ningxia, China; 2. Shennongfutong (Shanxi) Agricultural Planning and Design Research Co., Ltd., Taiyuan 030000, Shanxi, China; 3. Beijing Research Centre of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China; 4. Shanxi Agricultural University, Taiyu 030801, Shanxi, China)

Abstract: Recent years, the state proposes to accelerate the development of agricultural modernization, raise the production capacity and production level. Facility agriculture is one of the important form of agriculture modernization, and it is a significant sign for a country that measuring the level of agriculture modernization. Substrate cultivation is a vital method for tomato in greenhouse cultivation, which is convenient for nutrient management and can save the water and fertilize. Furthermore, it also can effectively limit the soil-borne disease. So it become the leading way that efficient cultivation of facility agriculture. The water and fertilizer managements are the key factors for substrate cultivation of tomato in greenhouse. Researchers have already carried out research on concentration of nutrient solution, nutrient solution recipe, irrigation frequency of nutrient solution and so on, which initially revealed nutrient solution management. But nutrient solution irrigation was still extensive and the salt accumulation of root zone was severe. Here, we presented status of substrate culture of tomato when it was cultivated in greenhouse, summarized some experience in regulating, analysed the problem and drawback in this respect, and discussed the development trend in the past several years.

Key words: Greenhouse tomato; Substrate culture; Nutrient regulation; Digital agriculture

21世纪以来,我国设施园艺呈现快速发展的趋势,2022年“中央一号”文件也提出要加快发展设施农业,为今后我国设施农业发展提供了有力支持,在国家乡村振兴政策助推下,设施园艺已成为山东

寿光、河北衡水等地区农业和农村发展的重要支柱产业^[1],但经长年的设施栽培,土壤暴露出板结、酸化、盐渍化等威胁设施园艺可持续发展的问题。无土栽培技术人为创造作物生长根系环境,可不受土

收稿日期:2022-10-11;修回日期:2022-12-09

基金项目:宁夏农林科学院科技自主创新专项科技成果转化项目-固原市特色产业提质增效技术集成与示范(NNKZZCG-ZH-2021-06);2021年第六批自治区青年科技人才托举工程

作者简介:孙茜,女,硕士,主要从事蔬菜栽培研究。E-mail:18404985155@163.com

通信作者:王湛,男,副研究员,主要从事作物水肥高效利用研究。E-mail:wzyjsjt@163.com

壤条件限制,有效避免土壤连作障碍对作物生长的影响,解决传统土壤栽培下水气肥三者的供应矛盾,抑制土传病害发生^[2]。截止到2020年,我国无土栽培面积在5万 hm^2 左右^[3]。目前无土栽培主要包括水培和基质栽培2种,其中基质栽培又分为有机基质栽培、无机基质栽培和混合基质栽培三大类。与水培相比,基质栽培有固定植株、保持水分、透气和缓冲等作用^[4],且投资少,设备简单易操作^[5];与土壤栽培相比,基质栽培可按作物生长需求动态供给水分和养分,有利于作物提高光合效率^[6]、产量^[7]、品质^[8]和水肥利用效率^[9]。

番茄为一年生或多年生草本植物,果实含丰富的维生素类和钾,无胆固醇,是深受人们喜爱的蔬菜。近些年,我国番茄生产规模基本保持稳定,据农业农村部统计,2018年我国番茄栽培面积110.9万 hm^2 ,产量6483.2万t,其中设施番茄栽培面积达64.2万 hm^2 ,占番茄总栽培面积的57.9%^[10]。在番茄生产中,常规土壤栽培养分释放缓慢,不易满足番茄生长发育对高水肥的需求,基质栽培作为番茄设施栽培的一种重要栽培手段,可以人为创造番茄生长适宜的根系条件,并可通过营养液持续不断供给番茄生长发育所需的水分和养分,提高番茄产量^[11]。因此,基质栽培在设施番茄生产中应用越来越广。

设施番茄基质栽培中,水肥管理是生产的关键,同时也是生产中的技术难点。目前,我国设施番茄基质栽培水肥调控以经验为主,生产者也普遍认为高肥可获高产,未考虑不同生长阶段番茄对养分的动态需求,导致养分供给与作物养分需求不匹配,造成水肥浪费或养分供应不足,影响番茄产量和品质。前人研究发现,平均每季日光温室栽培蔬菜对氮(N)、磷(P)、钾(K)养分的吸收量分别仅占总投入量的24.5%、5.9%和34.0%^[12],合理地控制肥料用量,甚至减少肥料用量不仅不会降低番茄产量,而且可以改善番茄光合特性,提高番茄品质和肥料养分利用率^[13-15]。番茄基质栽培的养分主要来源于营养液,其浓度、供给频率和供液量以及元素配比是影响番茄养分吸收量、生长、产量及品质的主要因子^[16-18]。因此,笔者就番茄营养液浓度、营养液灌溉量、灌溉频率、灌溉方式及设施环境因子对番茄生长发育的影响进行综述,指出当前基质栽培番茄营养液调控技术存在的问题,并对今后的研究方向进行展望,为番茄基质栽培研究提供参考。

1 营养液调控技术

番茄生长所需的大量与微量元素中,除碳(C)、氢(H)、氧(O)3种元素可从大气中获取外,其他必须依靠根系吸收才能供植株正常生长发育,而营养液是根系吸收养分的主要来源,也是无土栽培技术的核心,对作物的生长发育、产量和品质均有一定影响^[19]。通常种植者会通过改变营养液灌溉浓度、营养液配方、营养液灌溉频率等方式促进番茄吸收养分,提高番茄产量、品质、养分利用效率等。

1.1 营养液浓度

营养液浓度是指一定量营养液中所含有的营养元素的量,通常用电导率(EC值)表示,EC值越大,浓度越高。营养液EC的变化对番茄品质、产量和养分利用率影响较为明显,当营养液灌溉浓度升高,可以促进番茄对氮、磷、钾、钙、镁等矿物质的吸收,提高品质,但降低单果质量^[20]和养分利用效率^[21]。目前普遍认为随着番茄生育期的延长营养液灌溉浓度应逐步提高。张芳等^[22]研究了基于叶片数增长的营养液浓度动态调控法,表明番茄每增加一片叶,营养液灌溉EC值提高 $0.1\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 时,有利于促进番茄生长和养分吸收,并提高了番茄产量和品质。鲁少尉等^[23]研究表明,基质栽培番茄苗期、花期、坐果期、成熟期适宜的营养液EC值分别为1.2、2.5、3.8、5.2 $\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 时果实品质最好,干物质质量损失最少。刘佳等^[24]用椰糠复合基质栽培番茄的试验结果表明,适当提高营养液浓度可以改善番茄品质,但过高浓度会导致产量和品质下降,番茄开花后,灌溉EC值为2.5、3.0、3.5 $\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 时均适合番茄生长,EC值为4.0 $\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 时适合短季节栽培,EC值为2.0 $\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 时适合长季节栽培。何诗行等^[25]的研究也表明,在岩棉短程栽培模式中,灌溉较高EC值营养液番茄生长发育及品质较好,EC为4 $\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 是最佳的灌溉EC值。雷喜红等^[26]的研究表明,在番茄第3穗果坐果后,灌溉EC值为3.0 $\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 时番茄产量最高,灌溉EC为4.0 $\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 时品质最好,灌溉EC为5.0 $\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 时虽然可提高番茄品质,但严重影响了番茄植株生长和产量提高。综合结果表明,番茄在幼苗期适宜的灌溉EC值为0.8~1.0 $\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$;定植到第一穗花开花或结果所需的EC值为1.0~1.5 $\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$;结果初期适宜的灌溉EC值为1.5~2.0 $\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$;结果后期适宜的EC值为2.0~4.0 $\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。短程栽培结果

期营养液 EC 宜偏高,长季节栽培宜偏低;冬季宜偏高,夏季宜偏低。在生产上要依据实际情况,合理调控番茄营养液浓度。

1.2 营养液元素配比

目前番茄基质栽培营养液配方有日本山崎配方、霍格兰德配方、日本园试配方等,不同配方主要区别为大量元素配比不同。为使营养液能满足番茄生长发育需求,研究者针对营养液中大量元素适宜配比开展了许多研究^[27-30]。氮(N)和钾(K)作为番茄生长中需求量最大的2种元素,共同参与碳氮代谢^[31],也是研究最多的2种元素。王军伟等^[30]的试验结果表明,N是影响番茄产量、叶片叶绿素含量、叶片光合速率的主要因子,K是影响可溶性糖、维生素C、番茄红素含量等品质指标的主要因子。在基质栽培条件下,营养液中N、K质量浓度分别为 $378\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $391\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,番茄产量最高、品质最优。李娟等^[27]研究了番茄坐果后营养液中不同氮钾比对番茄生长的影响。结果表明,提高营养液中K的浓度,可改善番茄品质,当K、N质量比为2.9:1.0时,有利于生产高品质番茄,但随着K、N质量比的提高,番茄产量逐渐降低。许桂梅等^[32]研究发现,番茄果实甜度与营养液中K含量呈正相关,适当增加营养液中K含量,可以提高番茄品质,但过量施用则会造成减产。也有研究表明,番茄对氮素的利用率较低,氮肥施用过多会降低番茄产量,增加硝酸盐累积量^[33]。而番茄对K的需求较高,常规营养液配方中的钾浓度往往不能满足番茄生长发育所需^[34],当钾素供应充足时番茄的叶绿素含量和光合速率均可达到最大值,并促进了植株对N、P的吸收^[35]。番茄在生长发育过程中,对水肥的需求是动态变化的,随着生育期的延长,番茄对水肥的需求逐渐增大,在果实膨大期和采收初期达到最大值,随后对水分的需求逐渐减少,而对肥料需求也迅速降低,且对不同元素的需求量的变化也不尽相同,水肥需求特征的变化直接影响着营养液中各元素含量的多少,不适宜的元素含量可能导致基质根区EC值增大或离子比例失衡,致使番茄植株缺素^[36]。因此,在基质栽培番茄长季节生产中,不仅要调整N、K元素的比例以符合番茄生产需求,还要随着生育期延长对其他元素需求的变化,动态调整营养液中其他元素的含量,避免根区盐分积累严重和植株养分缺失。同时,微量元素在番茄生长中也起着至关重要的作用^[37-38],在今后的研究中也要加强对营养液中微量元素的关注。

1.3 营养液温度

在基质栽培中,营养液直接灌溉于番茄生长的根部,所以一定程度上,营养液温度影响着番茄根区温度。前人研究认为,根区温度对番茄生长发育的影响比气温更显著^[39],不适宜的根区温度会影响根系呼吸作用和根系生理代谢^[40]。然而在设施基质栽培的番茄生产中,营养液储液罐一般放置于设施内,导致营养液温度易受外界温度的影响,尤其在冬季夜间、凌晨低温或夏季正午高温时段,设施最低温不到 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[41],最高温在 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上^[42]。营养液低温会降低溶质溶解度,导致部分溶质析出,降低营养液浓度,而营养液温度过高会促进番茄根系的呼吸作用,减少其氧含量,加速根系衰老^[43-44]。研究者针对营养液温度调控方式做了一些研究。李峰等^[45]采用冷水机降温技术对营养液进行降温处理,可将营养液温度控制在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,与室温相比可降低 $2\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。张明云^[46]采用电加热方式在冬季对营养液进行加温。结果表明,加温后番茄的单株产量、果实品质和水分利用率均有显著提升。目前对于大范围营养液温度或者根区温度的控制还比较困难,相应的设备也较少,或者调控成本较高,目前在实际生产中对营养液温度调控的案例也较少,今后应加强对低效高能的营养液温度调控方式的研究,减少不适宜的根区温度对番茄生长产生不利影响,提高植株养分利用效率和生产者经济效益。

1.4 营养液灌溉模式

目前设施番茄基质栽培常采用自动化灌溉方式进行营养液灌溉,主要灌溉模式有定时定量灌溉、基质含水量控制灌溉、辐射累积量控制灌溉等,后2种模式与第一种相比,可更能满足番茄生长对水肥的动态需求^[22,47]。采用基质含水量控制番茄营养液灌溉的模式一定程度上可以有效探测番茄对于水分的需求,但目前在实际使用中发现存在传感器测量误差大以及数据反馈时间延迟等问题,影响了番茄对水分和养分的准确吸收利用^[48]。依靠辐射累积量控制番茄营养液灌溉的模式是目前生产上使用效果较好的一种方式,在研究中也发现番茄适宜的灌溉量与番茄蒸腾作用密切相关,而光辐射是影响番茄蒸腾作用的主要环境因素,与养分之间存在“光肥平衡”关系^[49],所以光辐射不仅影响番茄耗水量,而且影响番茄吸收养分。因此,以辐射累积量为参考因子指导番茄水肥灌溉更加符合番茄对水分和养分需求规律。魏晓然^[47]的研究也表明,与基质含水量控制灌溉相比,以辐射累积量控制营养

液灌溉,更有利于番茄花期营养生长和果期生殖生长,降低番茄水肥用量,提高水分利用效率。

在相同的营养液供液模式下,不同的营养液供液量和供液频率对番茄果实品质有不同程度的影响^[50-52]。史晋鹏等^[53]研究了番茄珍珠岩栽培条件下,在供液时间相同时,每天供液2次比供液1、3、4、5次,番茄的产量高、品质好。张筱茜等^[54]的研究表明,番茄营养液2 d供应1次可以提高番茄果实可溶性糖、有机酸、维生素C等的含量。不同研究结果相差较大可能是由于栽培基质、栽培季节、品种以及供液量等因素不同。当供液频率相同时,加大番茄营养液供液量,产量增加,但由于过量的水分供应降低了番茄品质。近些年,研究者针对供液量和供液频率之间的耦合作用展开研究。研究结果表明,适当减少营养液供液量,同时增加供液频率可在保证产量的情况下提高番茄品质^[55-56]。哈婷等^[57]的研究也表明,在采用有机基质栽培番茄中,营养液高频灌溉及中等灌溉量时,有利于生产高糖番茄。在人工智能时代下,智能灌溉可依据对番茄的市场需求,通过判断番茄植株生长状态、当前生长环境以及种植管理措施等因素,智能决定营养液灌溉频率、灌溉量、灌溉时间、灌溉浓度等。但目前植株生长模型的缺失以及市面上传感器灵敏度、精确度参差不齐等问题,限制了番茄水肥智能化控制水平的提高,今后还需进行深入的研究。

2 营养液调控现状

营养液灌溉是将作物吸收利用的营养元素溶于水中,并以液体的形式灌溉于植物根部,实质上为水肥一体化技术。虽然目前水肥一体化技术的应用也较为普遍,相较于传统土壤栽培的施肥方法,养分利用率较高,但在实际生产和应用中还存在番茄根区盐分积累严重、营养液沉淀、养分利用效率低、生长期短等问题,严重制约了设施长季节基质栽培番茄的生长发育。

2.1 营养液调控方式较为粗放

番茄在基质栽培中可吸收利用的营养液是有限的,需要频繁的供给营养液,以保证番茄的正常生长,不同生育阶段,番茄对矿质元素吸收量不同。但目前对番茄矿物质吸收特点机制还尚不清楚,尽管有研究表明随着生育期延长,N、P、K含量先升高后降低,干物质积累速度表现为慢-快-慢的趋势^[58],在番茄生长后期,对养分的需求可能会降低^[59],但是相关方面的研究还较少。生产

上,人们依旧是随着生育期延续,依据种植经验调高营养液浓度或加大灌溉量等方式,未考虑番茄生长中实际需求量,营养液配方也未依据番茄实际生长中对单一或多种矿物质元素需求情况进行动态调整。在植株养分监测技术方面,植株养分无损测量技术还未真正得到应用。目前采用的养分测量技术需要破坏植株,耗时耗力,这也成为番茄基质栽培营养液精准调控的障碍之一。

2.2 栽培基质根区盐分积累较为严重

前人研究认为,当根区营养液浓度超过 $6 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ (根区胁迫临界值)时,则会造成根区盐分胁迫^[60]。这种现象是由多种因素造成的,一方面番茄植株耗水量大,尤其是在夏天,叶片蒸腾作用较强,水分吸收较多,导致矿质养分逐渐累积到基质中,长时间造成根区盐分胁迫,影响番茄水分和养分吸收,表现较多的为 Ca^{2+} 缺失而引起的脐腐病^[61]。另一方面,由于不同生育时期番茄对不同营养元素的需求不尽相同^[62],长期对某种元素吸收减少必然会导致元素逐渐累积于根区。除以上原因之外,还有可能由于营养液沉淀,在灌溉到根区时,不能被植株吸收,而累积到根部,这种情况同时还会堵塞滴灌管,影响灌溉。研究者针对根区盐分胁迫的现象,通过调整灌溉量和灌溉频率^[63]、营养液配方^[48]以及根区淋洗^[64]等多种方式,以减缓番茄基质栽培中盐分胁迫的问题,但并未达到理想的效果。

2.3 营养液灌溉设备应用程度较低

营养液精细化管理一般需配套完善的滴灌系统,包括施肥机、灌溉管道等,一次性投入较多,生产中水溶肥与普通肥相比价格较高,增加了生产成本。营养液精细化管理对技术员水平要求较高,不仅需要掌握基质栽培番茄的种植技术,而且还要对农业气象、植株缺素症状、营养元素配比、水肥一体化设备等方面的综合知识有深入了解。但目前的管理员普遍年龄偏大,受教育程度不高,在基质番茄栽培灌溉过程中,依靠人工经验判断营养液灌溉水平,即使在前期营养液灌溉的水肥一体化设备配备完善,也未能充分发挥其作用,限制了无土栽培技术的进一步推广应用。

3 总结与展望

营养液调控技术是无土栽培技术的关键,不断优化营养液调控技术,提高无土栽培番茄营养液灌溉水平,减少水肥浪费,发展绿色农业与智慧农业,是今后无土栽培的重要发展方向。

3.1 集成营养液调控技术

从营养液配方、营养液灌溉模式、营养液灌溉装置等多方面综合发力,研究开发适用于我国特色的营养液调控技术。在营养液配方方面,积极推广有机营养液,加强有机废弃物发酵技术及发酵配方研究,提高有机营养液养分含量。前人研究表明,使用有机营养液替代传统无机营养液,不仅可以提高作物品质,而且可以减轻化肥施用造成的农业面源污染^[65]。积极推行营养液循环利用,加强营养液循环利用中营养液消毒、回液养分调整等的技术难题攻关,提高养分利用效率,减少不必要的水分与养分浪费,推进农业绿色循环发展。同时,加强营养液根区盐分胁迫、根区温度调控以及营养液滴灌管堵塞等方面问题的研究解决,全方位提升营养液调控技术水平。

3.2 营养液灌溉精细化

不同作物在不同生长阶段对养分、水分的需求不尽相同^[1],传统依据人工经验进行作物营养调控的方式已经不能满足现在绿色农业的发展需求,作物养分吸收了多少,还需要多少,还需要什么元素,这些是作物种植者在给作物补充营养时应该考虑的问题。因此,不论是土壤栽培还是无土栽培,依据作物自身需求的精准施肥,均被认为是一种对植物生长发育有效,且绿色、科学的施肥方法。其依托于多种现代先进技术的支撑,其中包含人工智能、农业物联网、高光谱无损探测技术、水肥一体化技术等^[3]。在国家近几年对农业发展的大力支持下,这些技术的研究和应用都有了一定的进展,为植株精准施肥提供了技术支撑,同时也促进了无土栽培植株营养液精细调控技术发展。今后,还应重点加强设施环境监测传感器、植株养分无损检测等技术方面的研究,提高番茄营养液精细化灌溉水平。

3.3 设施水肥与环境综合调控

水肥调控是设施番茄基质栽培的核心,但设施环境的调控也同样重要,尤其是夏季高温和冬季低温严重影响番茄正常生长发育^[66],目前生产上常采用湿帘风机降温,电或水根部加温,但并未有效减缓低温或高温对作物的危害。尤其是北方夏季晴天,白天设施温度基本达到30℃以上,甚至超过40℃,常规湿帘风机降温作用微弱,而采用遮阳网又影响植株光合作用^[67]。因此,调控设施中的一项环境因子,会改变其他环境因子对作物生长影响,且环境因子间也存在正相关、负相关关系,这些环

境因子与水肥条件共同对植株的生长发育起作用。在调控中需要综合考虑,合理调控设施栽培条件下植株适宜的营养液灌溉浓度和环境指标,以满足作物正常生长需求,提高产量与种植收益。

3.4 设施智能化发展

在物联网、大数据、云计算等信息技术对农业的推动下,数字农业的发展迎来了更大发展机遇,并为转变农业生产方式、提高农业生产效率提供有力支撑^[68]。研究者也针对温室智能控制决策^[69]、智能温室环境调控方法^[70]、温室智能机器人^[71]等方面开展了许多研究,但由于目前作物生长模型、作物营养元素动态监测方法等的缺失,致使当前的智能控制只是基于温度、湿度、养分、光照、水分、CO₂浓度环境传感器,对环境设定值和水肥设定值等的控制,无法感知植物是否需求这样的控制,不能达到按照植物真实动态需求信息进行反馈控制。因此,不仅设施作物水肥与环境耦合调控是今后研究的重点方向,而且不同作物生长模型的构建也是今后研究的重点内容,与植物对话式的智能控制方式是智能温室今后高效利用的目标。

参考文献

- [1] 孙锦,高洪波,田婧,等.我国设施园艺发展现状与趋势[J].南京农业大学学报,2019,42(4):594-604.
- [2] 刘艳伟,吴景贵.有机栽培基质的研究现状与展望[J].北方园艺,2011(10):172-176.
- [3] 孙锦,李谦盛,岳冬,等.国内外无土栽培技术研究现状与应用前景[J].南京农业大学学报,2022,45(5):898-915.
- [4] 郭世荣.无土栽培学[M].北京:中国农业出版社,2003.
- [5] 宁艳民.不同无土栽培方式对蔬菜品质的影响[J].南方农业,2018,12(26):22-23.
- [6] 刘中良,高昕,张艳艳,等.基质栽培与土壤栽培番茄品质产量的比较研究[J].江苏农业科学,2020,48(1):124-127.
- [7] 杨俊雪,王冲,石如岳,等.基质栽培对番茄产量和品质影响的Meta分析[J].中国瓜菜,2021,34(6):47-53.
- [8] 周杨,李涛,夏秀波,等.不同栽培形式对嫁接番茄生长及果实品质的影响[J].长江蔬菜,2017(8):46-48.
- [9] 孙茜,徐凡,王湛,等.CO₂微加富下营养液调控对番茄生长及水肥利用效率的影响[J].山西农业科学,2020,48(3):420-425.
- [10] 李君明,项朝阳,王孝宣,等.“十三五”我国番茄产业现状及展望[J].中国蔬菜,2021(2):13-20.
- [11] 宋发成,刘元义,DOMENICO L,等.荷兰番茄基质无土栽培主要技术的研究与探讨[J].山东理工大学学报(自然科学版),2020,34(1):58-63.
- [12] 周婷.日光温室蔬菜施肥现状及减肥潜力研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2017.
- [13] KINOSHITA T, YAMAZAKI H, INAMOTO K, et al. Analysis of yield components and dry matter production in a simplified soilless tomato culture system by using controlled-release fertil-

- izers during summer-winter greenhouse production[J]. *Scientia Horticulturae*, 2016, 202: 17-24.
- [14] 张芳园,刘玉春,蔡伟,等.水氮调控对日光温室番茄生长和产量的影响[J]. *中国农村水利水电*, 2018(4): 1-5.
- [15] 赵常旭.控释肥对基质栽培番茄产量、品质及养分吸收利用的影响[D].兰州:甘肃农业大学, 2016.
- [16] 李英杰,林俊凤,辛晓菲,等.我国设施番茄基质无土栽培技术研究进展[J]. *中国果菜*, 2022, 42(7): 61-65.
- [17] 孙丽丽,邹志荣,韩丽蓉,等.营养液滴灌频率对设施番茄生长与果实品质的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(3): 119-124.
- [18] 孟鑫,吕剑,罗石磊,等.不同营养液浓度对日光温室番茄果实品质的影响[J]. *中国蔬菜*, 2021(10): 85-90.
- [19] 曹玉鑫,曹红霞,王萍,等.营养液浓度对番茄生长、品质以及耐贮性的影响[J]. *食品科学*, 2018, 39(7): 63-70.
- [20] CLIFF M A, LI J B, TOIVONEN P M A. 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.
- [21] 柳美玉,曹红霞,杜贞其,等.营养液浓度对番茄营养生长期干物质累积及养分吸收的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(4): 119-126.
- [22] 张芳,薛绪掌,张建丰,等.基于叶片数增长动态的营养液供给对番茄生长、产量和品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(5): 1374-1383.
- [23] 鲁少尉,齐飞,李天来,等.营养液 EC 值对无土栽培番茄果实发育及蔗糖代谢的影响[J]. *北方园艺*, 2012(19): 8-11.
- [24] 刘佳,季延海,王宝驹,等.椰糠复合基质槽培番茄营养液浓度的研究[J]. *北方园艺*, 2020(6): 9-16.
- [25] 何诗行,何堤,许春林,等.岩棉短程栽培模式中营养液对番茄生长及果实品质的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(18): 188-195.
- [26] 雷喜红,李蔚,李新旭,等.营养液 EC 值对基质栽培番茄产量和品质的影响[J]. *蔬菜*, 2020(9): 68-71.
- [27] 李娟,李建设,高艳明,等.不同生育期营养液钾氮比对番茄生长和果实品质的影响[J]. *浙江农业学报*, 2016, 28(11): 1881-1889.
- [28] 蔡东升,李建明,樊翔宇,等.基质栽培营养液氮磷钾补充水平对番茄养分吸收及产量品质影响[J]. *东北农业大学学报*, 2017, 48(1): 7-14.
- [29] 王军君.氮钾营养对雾培系统中不同番茄品种产量和营养品质的影响[D].杭州:浙江大学, 2013.
- [30] 王军伟,黄科,毛舒香,等.基质栽培番茄营养液中氮、钾最佳浓度研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(11): 2019-2028.
- [31] 王军伟,黄科,董月霞,等.氮钾互作对番茄叶片碳氮代谢及产量和品质的影响[J]. *中国蔬菜*, 2020(9): 41-49.
- [32] 许桂梅,李具磊.营养液不同钾肥浓度对樱桃番茄生长的影响初报[J]. *上海农业科技*, 2020(6): 119-120.
- [33] 马跃.氮磷钾配比对温室番茄生长、产量和品质的影响[D].北京:中国农业科学院, 2010.
- [34] 张洋,李旺雄,刘晓奇,等.施钾量对设施基质栽培番茄生长生理及其产量和品质的影响[J]. *西北植物学报*, 2021, 41(10): 1725-1735.
- [35] 陆景陵.植物营养学(上册)[M].北京:北京农业大学出版社, 1994.
- [36] 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]. *农业机械学报*, 2017, 48(2): 224-231.
- [37] 李世莹,岳艳军,冯梦喜,等.多元中微量元素对番茄生长发育及产量的影响[J]. *农学学报*, 2018, 8(8): 27-31.
- [38] 张明中.番茄施硒的生理和品质效应及分子调控研究[D].重庆:西南大学, 2014.
- [39] 李宝石,王奇,刘文科,等.日光温室嵌膜式基质栽培对根区温度及番茄生长和产量的影响[J]. *山东农业科学*, 2021, 53(2): 24-28.
- [40] HE J, QIN L, LEE S K. Root-zone CO₂ and root-zone temperature effects on photosynthesis and nitrogen metabolism of aeroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L.) in the tropics[J]. *Photosynthetica*, 2013, 51(3): 330-340.
- [41] 袁丁,武占会,季延海,等.日光温室冬季基质加温效果及对番茄生长和品质的影响[J]. *中国蔬菜*, 2019(10): 39-43.
- [42] 路涛,余宏军,艾爽,等.营养液温度调控对设施越夏水培普通白菜生长与产量的影响[J]. *中国蔬菜*, 2021(12): 67-72.
- [43] 冯玉龙,刘恩举,崔臻祥.根系温度对番茄的影响(II):根系温度对番茄光合作用和水分代谢的影响[J]. *植物研究*, 1996, 16(2): 214-218.
- [44] 任志雨,王秀峰.根区温度对作物生长和生理代谢的影响综述[J]. *天津农学院学报*, 2003, 10(2): 32-36.
- [45] 李锋,余礼根,李银坤,等.营养液温度调控对设施越夏水培生菜产量与品质的影响[J]. *北方园艺*, 2016(22): 56-59.
- [46] 张明云.生长抑制剂与营养液温度对番茄生长发育的影响[D].河北邯郸:河北工程大学, 2017.
- [47] 魏晓然.日光温室番茄基质含水量及辐射累积量控制灌溉模式研究[D].北京:中国农业科学院, 2019.
- [48] 王亚萍.根际空间与水肥供给模式对基质培番茄生长及产量品质的影响[D].山东泰安:山东农业大学, 2020.
- [49] 魏晓然,程瑞锋,杨其长,等.辐射累积量控制的灌溉模式下温室番茄生长与水肥利用研究[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(18): 3531-3541.
- [50] 邱渊,赵连圆,胡田田,等.水肥供应对番茄生长及产量形成的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2016, 34(2): 245-251.
- [51] 郭鹏.不同基质和灌溉模式对封闭式槽培番茄生长发育的影响[D].河北邯郸:河北工程大学, 2020.
- [52] 周文波.不同营养液配方与供液量对椰糠袋培高糖度番茄和南瓜产量和品质的影响[D].银川:宁夏大学, 2018.
- [53] 史晋鹏,刘明池,季延海,等.不同供液频率对基质槽培番茄产量和品质的影响[J]. *新疆农业科学*, 2014, 51(6): 1058-1063.
- [54] 张筱茜,郭鹏飞,张坤,等.滴灌频率和施氮量对番茄生长及硝酸还原酶的影响[J]. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2018, 36(1): 57-62.
- [55] 吴泳辰,韩国君,陈年来.调亏灌溉对加工番茄产量、品质及水分利用效率的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2016, 35(7): 104-107.
- [56] 林兴军.不同水肥对日光温室番茄品质和抗氧化系统及土壤环境的影响[D].北京:中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心), 2011.

- [57] 哈婷,张向梅,李建设,等.营养液供液量及供液频率对高糖度番茄生长、产量及品质的影响[J].西北农业学报,2017,26(10):1484-1491.
- [58] 王丹丹,张庆银,李燕,等.日光温室袋培番茄氮、磷、钾、钙、镁营养吸收分配规律研究[J].河北农业大学学报,2021,44(1):33-40.
- [59] 张海.日光温室架式栽培番茄水肥需求规律及供给模式研究[D].山东泰安:山东农业大学,2016.
- [60] SCHWARZ D, KUCHENBUCH R. Water uptake by tomato plants grown in closed hydroponic systems dependent on the EC-level[J]. Acta Horticulturae, 1998(458):323-328.
- [61] 武雅文,顾闽峰,隆小华.番茄脐腐病发生与元素运移的关系[J].江苏农业科学,2017,45(20):117-120.
- [62] 王丹丹,张庆银,李燕,等.日光温室袋培番茄氮、磷、钾、钙、镁营养吸收分配规律研究[J].河北农业大学学报,2021,44(1):33-40.
- [63] 李炎艳,季延海,武占会,等.灌溉模式对封闭式无机基质槽培番茄产量和品质的影响研究[J].河北农业大学学报,2020,43(1):39-47.
- [64] 王朝军,徐凡,郭文忠,等.低浓度营养液淋洗缓解基质栽培番茄根际养分富集的效果[J].中国农业气象,2021,42(3):200-212.
- [65] 曹行行,杨官凯,祁瑞雪,等.有机营养液灌溉下发酵秸秆添加生物炭对番茄生长和品质影响[J].中国土壤与肥料,2022(2):134-142.
- [66] 黄琴琴,杨再强,刘显男,等.苗期高温高湿影响番茄花芽分化进程的机理探讨[J].中国农业气象,2021,42(1):56-68.
- [67] 朱雨晴,薛晓萍.遮阴及复光对花果期番茄叶片光合特性的影响[J].中国农业气象,2019,40(2):126-134.
- [68] 张力.数字农业全产业链数字化发展模式[J].数字农业与智能农机,2022(16):83-85.
- [69] 卜娜娜,刘新良,李国民,等.基于改进 D-S 理论与 SVM 后验概率的温室智能控制决策[J].计算机应用与软件,2022,39(7):20-25.
- [70] 于玉婷,徐光丽,柳平增,等.设施番茄温室风口开关时间参数研究[J].中国农机化学报,2022,43(12):83-90.
- [71] 刘芳,刘玉坤,林森,等.基于改进型 YOLO 的复杂环境下番茄果实快速识别方法[J].农业机械学报,2020,51(6):229-237.