

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

张 洋¹, 李旺雄¹, 刘晓奇¹, 王俊文¹, 唐中祺^{1*}, 郁继华^{1,2}

(1 甘肃农业大学 园艺学院, 兰州 730070; 2 甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 兰州 730070)

摘 要:以番茄品种‘184’为材料, 采用水肥一体化番茄设施基质栽培模式, 以甘肃农业大学植物营养液配方 C 中钾肥为对照(T_1 常规钾肥量), 再在配方 C 中添加不同量钾肥组成 T_2 (钾肥增量 25%)、 T_3 (钾肥增量 50%)、 T_4 (钾肥增量 75%) 等处理, 探究不同施钾量对设施基质栽培番茄生长、生理、产量及品质的影响, 并筛选设施基质栽培条件下最佳施钾量。结果显示: (1) 与常规施钾肥量(T_1) 相比, 增施钾肥处理(T_2 – T_4) 均可显著提高番茄株高、茎粗、根系活力, 且 T_3 处理的各指标均最高, 但增施钾肥对叶片数的影响不显著。 (2) 增施钾肥处理较 T_1 均能够显著提高番茄叶片光合色素含量, 增强光合和荧光过程, 进一步促进光能的吸收与转化, 且 T_3 处理的增幅最高。 (3) 随着施钾量的升高, 增施钾肥处理的番茄单果重、果实产量呈现不同程度的增长趋势, 适量增施钾肥处理增幅均达到显著水平, 并以 T_3 番茄产量最高, 且较 T_1 显著增产 20.87%。 (4) 与 T_1 相比, 各施钾处理番茄果实硬度、可溶性总糖、Vc、可溶性蛋白、番茄红素含量等均有不同程度提升, 各指标均随着施钾量增加呈先上升后下降的变化趋势, 并在 T_3 处理下达到最优。 (5) 主成分分析表明, 各处理的综合得分依次为 $T_3 > T_4 > T_2 > T_1$ 。研究发现, 在设施基质栽培条件下, 适量增施钾肥能显著提高番茄植株光合作用效率, 促进植株生长, 达到提高果实产量和改善品质的目的, 并以常规钾肥增量 50% 处理的效果最佳。

关键词: 番茄; 设施基质栽培; 施钾量; 生长生理; 果实产量; 果实品质

中图分类号: Q945.79; S641.2

文献标志码: A

Effect of Potassium Application Rate on Growth Physiology, Yield and Quality of Tomato Cultivated in Facility Substrate

ZHANG Yang¹, LI Wangxiong¹, LIU Xiaoqi¹, WANG Junwen¹, TANG Zhongqi^{1*}, YU Jihua^{1,2}

(1 College of Horticulture, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. Gansu Provincial Key Lab of Arid Land Crop Sciences, Lanzhou 730070, China)

Abstract: We used tomato cultivar ‘184’ as material, adopting the tomato protected substrate cultivation mode of water and fertilizer integration, taking the potassium fertilizer in plant nutrient solution formula C of Gansu Agricultural University as the control T_1 (conventional potassium fertilizer amount), and then adding different amounts of potassium fertilizer to formula C to treat T_2 (potassium fertilizer increment 25%), T_3 (potassium fertilizer increment 50%), T_4 (potassium fertilizer increment 75%), To explore the effects of different potassium application rates on the growth, physiology, yield and quality of tomato cul-

收稿日期: 2021-04-09; 修改稿收到日期: 2021-08-28

基金项目: 国家大宗蔬菜产业技术体系 (CARS-23-C-07); 国家重点研发计划 (2018YFD0201205); 中央引导地方科技发展专项 (ZCYD-2020-5); 甘肃农业大学科研启动基金 (GAU-KYQD-2019-19)

作者简介: 张 洋 (1995–), 男, 在读硕士研究生, 主要从事蔬菜栽培与生理生态研究。E-mail: 554300709@qq.com

* 通信作者: 唐中祺, 讲师, 博士, 主要从事设施蔬菜栽培逆境生理、设施设计与建造研究。E-mail: tangzq@gsau.edu.cn

tivated in protected substrate, and to screen the best potassium application rate under the condition of protected substrate cultivation. The results showed that: (1) compared with the conventional potassium fertilizer application (T_1), the increased application of potassium fertilizer ($T_2 - T_4$) can significantly increase tomato plant height, stem thickness, and root vigor, and all the indicators of T_3 treatment are the highest, while the effect of increasing potassium fertilizer on the number of leaves was not significant. (2) Compared with T_1 , the potassium fertilizer treatment can significantly increase the photosynthetic pigment content in tomato leaves, enhance the photosynthesis and fluorescence process, and further promote the absorption and transformation of light energy, and the T_3 treatment has the highest increase. (3) With the increase of potassium application rate, tomato single fruit weight and fruit yield of increased potassium fertilizer treatments showed different degrees of growth trends. Appropriate increase of potassium fertilizer treatments reached a significant level, and the T_3 tomato yield was the highest, and significantly increased 20.87% production by T_1 . (4) Compared with T_1 , the hardness, total soluble sugar, Vc, soluble protein, and lycopene contents of tomato fruits in each potassium application treatment increased to varying degrees, and each index increased first and then decreased with the increase of potassium application. The trend of change and reach the optimal under T_3 treatment. (5) Principal component analysis shows that the comprehensive score of each treatment is $T_3 > T_4 > T_2 > T_1$. The study found that under the condition of facility substrate cultivation, adding a proper amount of potassium fertilizer can significantly improve the photosynthesis efficiency of tomato plants, promote plant growth, and achieve the purpose of increasing fruit yield and quality. The effect of treatment with a 50% increase in conventional potassium fertilizer was the best.

Key words: tomato; protected substrate cultivation; potassium ratios; growth physiology; fruit yield; fruit quality

番茄(*Solanum lycopersicum*)为茄科番茄属一年生草本植物^[1-2]。其果实多汁,味道鲜美,食用方法多样,富含维生素C、可溶性糖、有机酸、矿物质等营养物质,还含有类胡萝卜素、类黄酮和酚酸等对人体有益的生物活性物质^[3-5]。番茄因其独特的风味、特殊的口感和其较高的营养价值成为中国人民餐桌上不可或缺的重要蔬菜之一^[6],同时也是北方日光温室及中国设施栽培的主栽蔬菜之一,具有较高的科研和经济价值^[7-10]。

钾元素是植物体内多种酶的活化因子,能够平衡及缓冲细胞内的离子,可帮助植物体内物质的转运、合成,并在光合作用方面有着重要的作用^[11-12]。钾元素也是植物所必需的大量营养元素,它不仅能显著提高农作物的产量,还能改善产品的品质,所以又被称为“品质元素”^[13]。例如,钾肥可以显著提高黄瓜产量^[14],充足的钾肥可以显著增加甜瓜产量,提高甜瓜可溶性固形物含量及抗坏血酸浓度,延长甜瓜的货架期^[15-16]。番茄是需钾量较大的作物,施入钾肥可以显著降低番茄果实中硝酸盐的含量,提高番茄果实中番茄红素的含量,减少病果烂果数量,且可以提高果实的糖酸比、可溶性固形物的含量和果实的质量,进而提高加工番茄的品质^[17]。

在中国设施蔬菜种植面积不断扩大的同时,随

之而来的还有各种问题,特别是施用过量的化肥致使土壤板结及盐渍化,破坏了土壤的群落结构及植物的根际环境,不仅造成土壤环境失调,也造成了蔬菜品质的下降,风味物质的减少或消失^[18]。如何合理施用化肥来提高蔬菜品质,让人们吃上健康、富含营养的蔬菜已经成为如今研究者的热门研究方向。因此,本试验以“184”番茄品种为研究材料,在日光温室基质栽培条件下,通过设置不同施钾量来处理,探究设施基质栽培番茄生长生理、产量及品质对不同施钾量的响应特征;同时,在日光温室番茄生产中施用钾肥,测定植株形态、生理生长、产量及品质等相关指标,以筛选出适宜番茄生长发育的施钾量,为今后北方地区冬季日光温室越冬番茄高品质栽培生产提供理论基础。

1 材料和方法

1.1 试验设计

本试验在甘肃省榆中县城关镇李家庄栖云山国家田园综合体六区2号日光温室中进行。该温室东西长60 m,跨度为10 m;栽培模式为槽式栽培,栽培槽长、宽、深规格分别为9 m、0.4 m、0.25 m,每槽填充基质体积为1 m³(基质购自甘肃省绿能农业科技股份有限公司),栽培槽南北向平行排列,槽间

留有走道。基质 EC 为 $2.2 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$, pH 为 7.8, 田间最大持水量为 76.55%, 容重为 $583.91 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 全 N 为 $1593 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解 N 为 $491.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效 P 为 $125.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效 K 为 $341.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。温室前茬作物为西瓜。供试番茄品种为‘184’, 供试施肥配方使用甘肃农业大学植物营养液配方 C(表 1)。

试验采用基质栽培, 于 2019 年 9 月 15 日进行穴盘育苗, 待幼苗长至 5 叶 1 心时定植, 定植时间为 11 月 2 日。共定植 37 槽, 南北向平行排列, 槽间距为 70 cm, 每槽两行(南北行), 每行 19 株, 行间距为 40 cm, 每槽定植 38 株。试验以甘肃农业大学植物营养液 C 为常规钾肥, 根据钾肥用量不同, 共设 4 个钾肥处理, T_1 为常量钾肥(每亩 1.06 kg), T_2 — T_4 处理均在每亩施用纯 N 0.66 kg 、 P_2O_5 0.35 kg 的基础上, 再分别每亩施用 K_2O 1.32 kg (钾肥增量 25%)、 1.59 kg (钾肥增量 50%)、 1.85 kg (钾肥增量 75%)。本试验采用完全随机设计, 每个处理 4 次重复, 每个栽培槽为 1 个重复(小区), 共设置 20 个小区。定植前浇灌 2 次营养液, 缓苗结束后每 7 d 灌溉 1 次营养液, 灌溉方式为膜下滴灌, 应用水肥一体化设备。

1.2 测定项目及方法

1.2.1 生长指标 当番茄生长处于开花期(2020-1-10)时, 用卷尺测量株高, 用游标卡尺测量茎粗, 采用红四氮唑法(TTC 法)测定根系活力。

1.2.2 光合生理指标 当番茄生长处于开花期时, 使用 Ciras-2 (PP System Inc., Amesbury, MA 01913, USA)便携式光合仪测定各处理番茄同一片

功能叶光合气体交换参数净光合作用速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)和蒸腾速率(T_r); 同时使用脉冲式叶绿素荧光仪(FMS-2, Hansatech, Norfolk, UK)测定各处理番茄同一片功能叶的荧光参数 PSII 最大光化学效率(F_v/F_m)、PSII 有效光化学量子产量(ϕ_{PSII})、光化学猝灭系数(qP)、非光化学猝灭系数(NPQ)。

1.2.3 光合色素含量 采用丙酮提取法测定各处理叶片光合色素含量。在番茄开花期, 各处理随机采取番茄植株从上往下第 3 片功能叶, 用直径为 0.8 cm 打孔器采取叶片样品, 准确称取 0.1 g 叶片样品放入 25 mL 试管中, 加入 10 mL 80% 丙酮, 试管口用橡胶塞塞住, 套上双层黑色塑料袋, 置暗处浸提, 每 12 h 振荡 1 次, 至 48 h 叶片呈白色时, 振荡混匀后于 663、645、440 nm 下使用紫外可见分光光度计(UV-1800, SHIMADZU, Japan.)测定吸光值 OD_{663} 、 OD_{645} 和 OD_{440} , 用 80% 丙酮调零。最后使用以下公式计算叶绿素 a(C_a)、叶绿素 b(C_b)、总叶绿素(C_{a+b})和类胡萝卜素含量(C_{car}):

$$C_a = 12.21\text{OD}_{663} - 2.81\text{OD}_{645};$$
$$C_b = 20.13\text{OD}_{645} - 5.03\text{OD}_{663};$$
$$C_{a+b} = C_a + C_b;$$
$$C_{\text{car}} = 4.4\text{OD}_{440} - 0.01C_a - 0.45C_b,$$

1.2.4 果实品质指标及产量 在番茄盛果期, 选取各处理相同穗数且成熟度一致的番茄测定相关品质指标。其中, 番茄果实硬度使用 GY-4 数显式水果硬度计(浙江托普云农科技股份有限公司产品)测定; 果实鲜质量使用万分之一电子天平(赛多利斯科学仪器(北京)有限公司产品)称量; 将采收的果实用 DHG-9141A 型恒温鼓风干燥机(上海一恒科学仪器有限公司产品) 105°C 杀青 15 min 后, 80°C 烘干至恒质量, 用万分之一电子天平称量番茄果实干质量; 使用游标卡尺测量果实横径、纵径, 并计算果形指数(纵横径之比)。使用 PAL-1 手持式折射计[日本株式会社爱宕(Atago CO., Ltd.)产品]测定可溶性固形物含量; 使用蒽酮-硫酸比色法测定可溶性糖含量^[19]; 使用 2,6-二氯酚靛酚染色法测定 V_c 含量^[19]; 用碱液滴定法测定可滴定酸含量; 依据测定结果计算糖酸比(可溶性总糖含量与滴定酸含量之比)。使用考马斯亮蓝 G-250 溶液法测定可溶性蛋白含量^[19]; 使用紫外吸收法测定硝酸盐含量^[19]; 番茄红素的提取及测定参照柳帆红的方法^[20], 稍加改动, 使用高效液相色谱(HPLC)法测定。待番茄果实成熟后, 分次进行采收, 每次采收时称量并记录每

表 1 甘肃农业大学植物营养液配方 C(25 kg 溶解)

基本信息

Table 1 Formula C of plant nutrient solution of Gansu Agricultural University

成分及分子式 Molecular formula	用量 Dosage/kg	有效养分含量 Available nutrient content
KNO_3	2.275	N: (13.86%)0.3153 kg K_2O : (46.53%)1.0586 kg
$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	0.5625	N: (12.17%)0.0685 kg P_2O_5 : (61.74%)0.3473 kg
MgSO_4	0.6375	
$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	0.4	N: (46.67%)0.1867 kg
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	1.57	N: (5.93%)0.0931 kg
总量 Total	5.445	N: 0.66 kg; P_2O_5 : 0.35 kg; K_2O : 1.06 kg N: P_2O_5 : K_2O = 1.91: 1: 3.05

注: 营养液为 100 倍浓缩液

Note: Nutrient solution is 100 times concentrated solution

处理单果质量,单株结果数,换算为单位面积产量。

1.3 数据分析

采用 Excel 2016 软件处理试验数据和作图;使用 SPSS 20.0 软件,应用 LSD 和 Duncan's 检验法对显著性差异($P<0.05$)进行多重比较、描述,应用主成分分析法对测定指标进行综合评价。

2 结果与分析

2.1 施钾量对设施基质栽培番茄植株生长的影响

株高、茎粗、叶片数和根系活力可直观反映植株和根系的生长情况,是衡量植株是否健壮的重要指标。表 2 显示,与常量钾肥处理(T_1)相比,各施钾量处理(T_2-T_4)的番茄株高、茎粗、叶片数和根系活力均不同程度增加,且株高和根系活力增幅均达到显著水平,茎粗的增幅在 T_2 和 T_3 处理下也达到了显著水平,而叶片数在各处理下均无显著变化;随着施钾量的升高,番茄植株的株高、茎粗、叶片数和根系活力均呈现先增后减的趋势,并均在 T_3 处理下达到最大值,且均表现为 $T_3>T_2>T_4>T_1$;与常量钾肥处理(T_1)相比, T_3 处理设施番茄株高显著提高 5.21%, T_3 、 T_2 、 T_4 处理植株根系活力分别显著增加 38.53%、22.12%、21.11%,其余增施钾肥

处理相关指标增幅均未达到显著水平。以上结果说明在一定范围内,增施钾肥可以促进番茄植株根系的生长,进而促进根系对水及营养物质的吸收,从而显著促进植株的生长,但当施钾量继续持续升高时这种促进作用会显著减弱,其中以增施 50%钾肥的效果最佳。

2.2 施钾量对设施基质栽培番茄植株光合指标的影响

2.2.1 叶片光合色素含量 从表 3 可知,随着施钾量的增加,施钾量处理番茄叶片光合色素含量均表现出先增加后降低的变化趋势,并均在 T_3 处理下达到最高值;与 T_1 处理相比,各增施钾肥处理的叶片叶绿素 b 含量均无显著变化,其余光合色素含量均显著增加。其中, T_3 、 T_4 处理间的叶绿素 a 和总叶绿素含量无显著差异,但均显著高于 T_2 处理, T_2 、 T_3 、 T_4 处理间类胡萝卜素含量均无显著差异; T_3 处理番茄叶片叶绿素 a、总叶绿素和类胡萝卜素含量分别比 T_1 处理显著增加 33.81%、26.09%和 18.57%。可见,增施钾肥有利于设施番茄叶片光合色素含量的增加,并以叶绿素 a 和类胡萝卜素含量增幅表现更为明显,其中以 T_3 、 T_4 处理的效果最佳。

表 2 不同施钾量对设施基质栽培下番茄植株生长及根系活力的影响

Table 2 Tomato plant growth and root activity in protected substrate culture under different potassium application rates				
处理 Treatmens	株高 Plant height/cm	茎粗 Stem diameter/mm	叶片数 Number of blades	根系活力 Root activity/ $(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1})$
T_1	107.78±0.58b	12.03±0.24ab	14.20±0.37a	1 214.00±19.28c
T_2	111.00±1.76ab	12.90±0.10a	14.80±0.20a	1 482.52±56.41b
T_3	113.40±1.17a	12.98±0.17a	14.80±0.20a	1 681.78±33.90a
T_4	109.68±0.22ab	12.40±0.20ab	14.60±0.24a	1 470.30±18.09b

注: T_1-T_4 。在施用纯 N 0.66 kg、 P_2O_5 0.35 kg 的基础上,再分别施用不同量钾肥: T_1 . 常量钾肥; T_2 . 钾肥增量 25%; T_3 . 钾肥增量 50%; T_4 . 钾肥增量 75%。同一列数据后不同小写字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著($P<0.05$);下同

Note: T_1-T_4 . On the basis of pure N 0.66 kg and P_2O_5 0.35 kg, different amounts of potassium fertilizer were applied separately: T_1 . Regular fertilization; T_2 . Potassium fertilizer increment 25%; T_3 . Potassium fertilizer increment 50%; T_4 . Potassium fertilizer increment 75%. After the same column data, different normal letters indicate significant difference at the 0.05 level. The same as below

表 3 不同施钾量对设施基质栽培下番茄光合色素含量的影响

Table 3 The photosynthetic pigment contents of tomato cultivated in greenhouse substrate under different potassium application rates/ $(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$

处理 Treatment	叶绿素 a Chlorophyll a	叶绿素 b Chlorophyll b	总叶绿素 Total chlorophyll	类胡萝卜素 Carotenoids
T_1	1.39±0.03c	0.45±0.05a	1.84±0.05c	0.70±0.02b
T_2	1.70±0.03b	0.45±0.04a	2.15±0.05b	0.80±0.01a
T_3	1.86±0.02a	0.46±0.03a	2.32±0.03a	0.83±0.01a
T_4	1.85±0.02a	0.43±0.03a	2.29±0.03a	0.80±0.01a

2.2.2 光合气体交换参数 测定结果(表 4)显示,不同施钾处理下,随着施钾量的增加,各施钾处理的胞间 CO₂ 浓度、蒸腾速率、气孔导度、净光合速率基本均呈现出先升高后降低的变化趋势,并均在 T₃ 处理下达到最大值,且各指标均表现为 T₃、T₄ 处理显著高于 T₂、T₁,而前两者间和后两者间均无显著差异。其中,T₃ 处理叶片的胞间 CO₂ 浓度、蒸腾速率、气孔导度、净光合速率分别比 T₁ 处理(常量施钾)显著提高 14.42%、28.10%、51.12%、10.62%。可见,增施钾肥有利于设施番茄叶片光合作用的进行,并以 T₃ 处理的效果最佳。

2.2.3 叶绿素荧光参数 叶绿素荧光参数测定结果(表 5)表明,不同施钾量处理间,设施番茄叶片 PSⅡ最大光化学效率(F_v/F_m)、PSⅡ有效光化学量子产量($\varphi_{PSⅡ}$)、光化学猝灭系数(qP)均未存在显著差异,但基本都呈现先上升后下降的变化趋势,在

T₃ 处理下达到最大。与常量施钾处理(T₁)相比,增施钾肥后设施番茄叶片 $\varphi_{PSⅡ}$ 在 T₂—T₄ 处理下显著增加,并在 T₃ 处理下达到最高值,但 T₃ 与 T₄ 处理间均无显著差异;T₃ 处理 $\varphi_{PSⅡ}$ 较 T₁ 处理显著提高 37.31%。可见,适量增施钾肥可显著促进设施基质栽培番茄叶片光合过程。

2.3 施钾量对设施基质栽培番茄果实品质的影响

2.3.1 外观品质 设施基质栽培番茄外观品质测定结果(表 6)显示,由于施钾量的不同,设施基质栽培番茄的外观品质发生了许多改变,呈现出不同的变化趋势。随着施钾量的升高,番茄硬度呈逐渐增加趋势,单果鲜质量、单果干质量、果形指数均呈现先增加后下降的变化趋势,并多在 T₃ 处理下达到最大值,而含水率呈逐渐降低的趋势。其中,果实硬度在各增施钾肥处理(T₂—T₄)下均显著高于 T₁ 处理(常量钾肥),T₃ 处理较 T₁ 处理提高 71.12%,而

表 4 不同施钾量对设施基质栽培下番茄光合气体交换参数的影响
Table 4 The photosynthetic gas exchange parameters of tomato cultivated in greenhouse substrate under different potassium application rates

处理 Treatment	胞间 CO ₂ 浓度 Internal CO ₂ concentration ($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)	蒸腾速率 Transpiration rate ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	气孔导度 Stomatal conductance ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	净光合速率 Photosynthesis rate ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
T ₁	320.4±1.29c	9.68±0.40b	651.8±4.95c	22.78±0.25c
T ₂	341.4±4.13b	9.44±0.36b	671.8±11.69c	23.80±0.16b
T ₃	366.6±2.01a	12.40±0.07a	985.0±3.77a	25.20±0.10a
T ₄	361.4±1.69a	12.30±0.14a	849.4±11.08b	25.14±0.24a

表 5 不同施钾量对设施基质栽培下番茄叶片叶绿素荧光参数的影响
Table 5 The fluorescence parameters of tomato cultivated in greenhouse substrate under different potassium application rates

处理 Treatment	PSⅡ最大光化学效率 F_v/F_m	PSⅡ有效光化学量子产量 $\varphi_{PSⅡ}$	光化学猝灭系数 qP	非光化学猝灭系数 NPQ
T ₁	0.75±0.05a	0.67±0.03c	0.49±0.11a	0.65±0.04a
T ₂	0.77±0.03a	0.83±0.01b	0.49±0.05a	0.67±0.04a
T ₃	0.84±0.01a	0.92±0.03a	0.73±0.08a	0.59±0.04a
T ₄	0.80±0.02a	0.87±0.01ab	0.72±0.02a	0.63±0.02a

表 6 不同施钾量对设施基质栽培下番茄外观品质的影响
Table 6 The appearance quality of tomato cultivated in greenhouse substrate under different potassium application rates

处理 Treatment	硬度 Firmness ($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$)	单果鲜质量 Fresh quality of single fruit/g	单果干质量 Dry weight of single fruit/g	含水率 Water content/%	果形指数 Shape index
T ₁	4.19±0.07c	100.92±0.77c	8.45±0.12b	90.33±0.13a	0.78±0.02a
T ₂	6.91±0.06b	105.53±1.41b	10.68±0.23b	89.77±0.15a	0.79±0.02a
T ₃	6.95±0.07b	119.82±1.30a	16.06±0.70a	87.10±0.60b	0.77±0.01a
T ₄	7.17±0.02a	115.32±3.02a	14.73±1.48a	87.23±1.20b	0.81±0.05a

T₂—T₄ 处理间无显著差异。单果鲜质量在各增施钾肥处理下较 T₁ 处理分别增加 4.57%、18.73%、14.27%，后两者增幅达到显著水平。单果干质量在各处理下的表现与鲜质量相似，T₃ 和 T₄ 处理显著高于 T₁、T₂ 处理，T₃ 处理比 T₁ 处理显著增加 90.06%，前两者间及后两者间均无显著差异。果实含水率在 T₃、T₄ 处理间无显著差异，但均显著低于其余处理。果形指数在各施钾肥处理间无显著差异。适量增施钾肥可以显著提高设施番茄果实硬度、单果重，降低果实含水率。

2.3.2 内在品质 图 1 显示，设施基质栽培番茄各内在品质会显著受到钾肥的影响。随着施钾量的增加，各施钾处理果实的可滴定酸含量先降后升，硝酸盐含量呈升-降-升的变化趋势，并均在 T₃ 处理下达到最低值，其余品质指标均呈先升后降的变化趋势，

并均在 T₃ 处理下达到最大值。其中，各增施钾肥处理(T₂—T₄)番茄果实可溶性固形物、维生素 C、可溶性蛋白、番茄红素含量均显著高于常量钾肥处理(T₁)，T₃ 处理又不同程度高于 T₂、T₄ 处理，T₃ 处理的可溶性固形物、维生素 C、可溶性蛋白、番茄红素含量分别比 T₁ 显著提高 29.75%、134.92%、45.45%、41.76%(图 1, A、E、F、G)；T₂—T₄ 处理果实可溶性总糖含量和糖酸比也不同程度地高于 T₁ 处理，但仅 T₃ 处理的增幅达到显著水平，分别比 T₁ 显著提高 39.05%和 67.51%(图 1, B、D)；果实的可滴定酸含量表现为 T₂ 和 T₄ 处理与 T₁ 处理均无显著差异，T₃ 处理显著低于其余处理，比 T₁ 处理显著降低 15.00%左右(图 1, C)；果实硝酸盐含量在 T₂ 处理下稍高于 T₁ 处理，在 T₃、T₄ 处理下均显著低于 T₁ 处理，并以 T₃ 处理的降幅最大，达到 31.28%

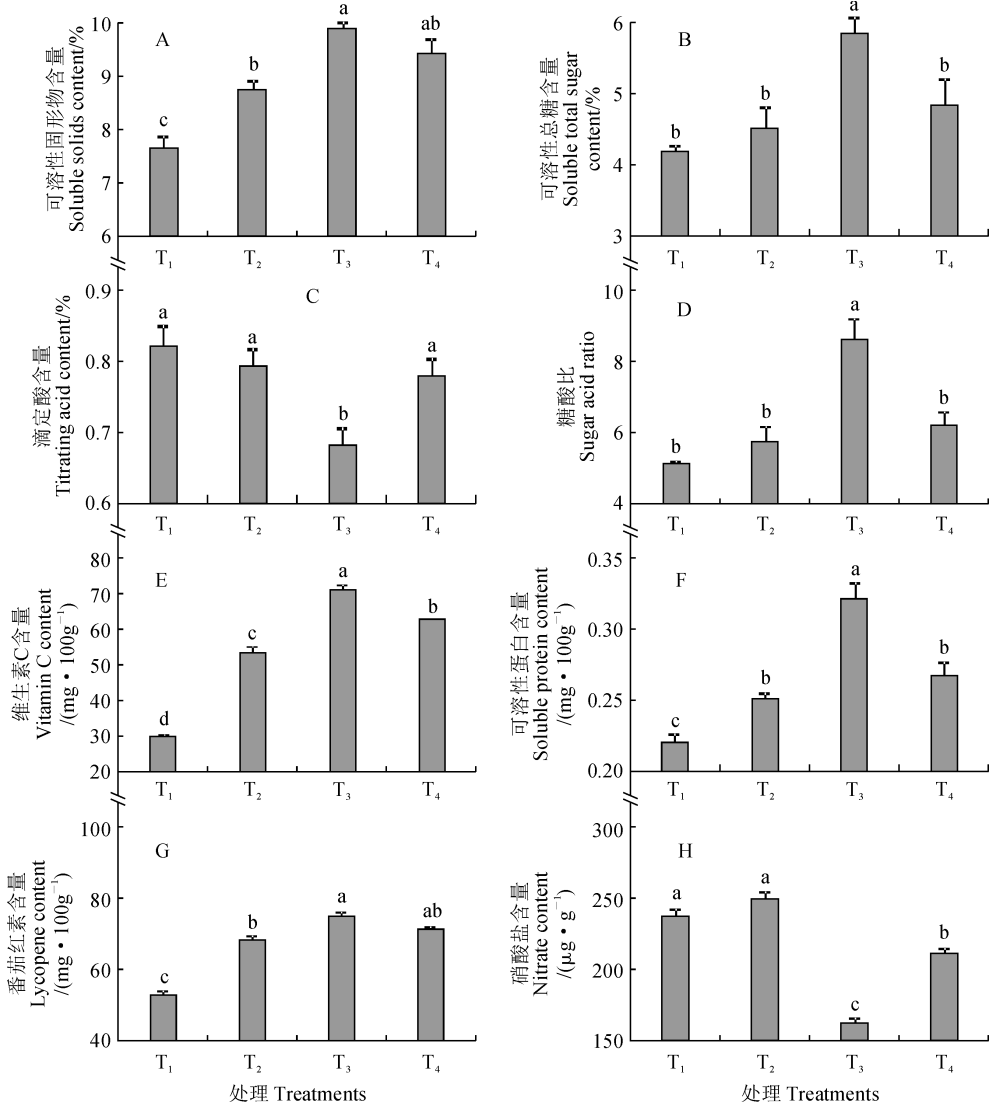


图 1 不同施钾量下设施基质栽培番茄内在品质的变化

Fig. 1 The internal quality of tomato cultivated in protected media under different potassium application rates

(图 1,H)。综合各项内在品质指标的表现可知,适量增施钾肥可以显著改善、提高设施番茄品质,有利于品质形成,并以 T₃ 处理的效果最佳。

2.4 施钾量对设施基质栽培番茄果实产量的影响

由表 7 可知,增施钾肥在不同程度上促进了番茄产量的增加。随着施钾量的增加,各指标均呈现出先上升后下降的趋势,并均在 T₃ 处理下达到最大值。与 T₁ 处理相比,T₂—T₄ 处理番茄单株果数均无显著变化;单果鲜质量在 T₂ 处理下无显著变化,在 T₃、T₄ 处理下分别显著增加 18.73%、13.54%;果实产量也在 T₂ 处理下无显著变化,在 T₃、T₄ 处理下分别显著增加 20.87%、19.57%。以上结果说明,增施钾肥均有利于设施番茄产量的形成,并以 T₃ 处理(施钾量增加 50%,每次施用 1.588 5 kg 的 K₂O)增产幅度最大,超过这一范围增产幅度则会降低。

2.5 不同施钾量下设施基质栽培番茄果实品质综合评价

2.5.1 果实生长及品质的主成分分析 主成分分析(PCA)是利用降维的思想,通过对指标体系内部结构关系的研究,在损失较少信息前提下,将多个指标转化为相互独立无关联的综合指标,再进行综合评价。新的综合变量可以反映出原来各项指标的主要信息,以此来简化数据结构并找出指标间的相互关系^[21-22]。本试验通过对株高、茎粗等 16 个指标为分析指标进行主成分分析,综合评价番茄各项指标对番茄生长、品质的影响。

经过主成分分析得到主成分特征向量、特征值、方差贡献率和累计方差贡献率如表 8 所示,本研究

按照累计方差贡献率大于 99% 的原则,选择了 3 个主成分。其中,第一、二、三主成分的特征值分别为 12.373、2.079、1.548,分别代表本试验各处理 16 项生长、品质指标 77.331%、12.997%和 9.672%的信息,这 3 个主成分累计方差贡献率达到 100.000%,即可反映原始变量 100.000%的信息,因此提取前 3 个主成分替代原 16 项指标评价番茄生长、品质。从而对番茄生长、品质的评价由原来 16 个指标降为 3 个相互独立无关联的主成分,达到了降维的目的。

2.5.2 果实品质综合评价 经主成分分析可知,前 3 个主成分的累计方差贡献率达到 100.000%,所以可以使用这 3 个主成分来构建分析模型。用各指标的主成分载荷值(表 9)除以相对应主成分特征值的开平方根,可以获得 3 个主成分中每个指标所对应的系数,即特征向量值,以特征向量值为权重构建 3 个主成分的函数表达式:

$$Z_1=0.15\ x_1+0.06\ x_2+0.08\ x_3+0.12\ x_4+0.26\ x_5+0.25\ x_6-0.26\ x_7-0.01\ x_8+0.22\ x_9+0.24\ x_{10}-0.23\ x_{11}+0.23\ x_{12}+0.20\ x_{13}+0.23\ x_{14}+0.17\ x_{15}-0.27\ x_{16}$$

$$Z_2=0.52\ x_1+0.64\ x_2+0.67\ x_3+0.59\ x_4+0.29\ x_5+0.28\ x_6-0.22\ x_7+0.01\ x_8+0.44\ x_9+0.30\ x_{10}-0.29\ x_{11}+0.28\ x_{12}+0.49\ x_{13}+0.37\ x_{14}+0.55\ x_{15}-0.07\ x_{16}$$

$$Z_3=-0.33\ x_1-0.27\ x_2-0.05\ x_3+0.26\ x_4+0.05\ x_5+0.21\ x_6-0.19\ x_7+0.80\ x_8+0.06\ x_9-0.26\ x_{10}+0.35\ x_{11}-0.33\ x_{12}+0.07\ x_{13}-0.21\ x_{14}+0.10\ x_{15}+0.25\ x_{16}$$

上述 3 个函数表达式中,x₁ 为株高,x₂ 为茎粗,

表 7 不同施钾量对设施基质栽培番茄产量的影响

Table 7 Effects of different potassium application rates on tomato yield under greenhouse substrate cultivation			
处理 Treatment	单果鲜质量 Fresh quality of single fruit/g	单株果数 Fruit number per plant	亩产量 Equivalent yield per 667 m ² /kg
T ₁	100.92±0.77c	22.20±0.58a	4 510.30±133.96b
T ₂	105.53±1.41b	22.20±0.37a	4 745.62±136.49b
T ₃	119.82±1.30a	22.60±0.51a	5 451.58±142.61a
T ₄	115.32±3.02a	22.40±0.51a	5 392.75±102.32a

表 8 番茄果实生长及品质指标主成分分析

Table 8 Principal component analysis of tomato fruit growth and quality index			
项目 Project	第一主成分 First principal component	第二主成分 Second principal component	第三主成分 Third principal component
特征值 Eigenvalues	12.373	2.079	1.548
贡献率 Contribution rate/%	77.331	12.997	9.672
累计贡献率 Cumulative contribution rate/%	77.331	90.328	100.000

表 9 番茄果实生长及品质指标三个主成分载荷矩阵

Table 9 Principal component load matrix of tomato fruit growth and quality indexes

指标 Index	第一主成分 First principal component	第二主成分 Second principal component	第三主成分 Third principal component
株高 Plant height	0.520	0.748	−0.411
茎粗 Stem diameter	0.221	0.917	−0.333
叶片数 Number of blades	0.266	0.962	−0.058
硬度 Firmness	0.406	0.856	0.320
单果鲜质量 Fresh weight of single fruit	0.907	0.416	0.063
单果干质量 Dry weight of single fruit	0.876	0.402	0.266
含水率 Water content	−0.921	−0.313	−0.233
果形指数 Shape index	−0.030	0.016	0.999
可溶性固形物 Soluble solids	0.771	0.633	0.077
可溶性总糖 Soluble total sugar	0.841	0.431	−0.328
可滴定酸 Titratable acid	−0.794	−0.418	0.441
糖酸比 Sugar acid ratio	0.817	0.406	−0.409
Vc 含量 Vitamin C content	0.705	0.703	0.093
可溶性蛋白 Soluble protein content	0.805	0.532	−0.262
番茄红素含量 Lycopene content	0.599	0.791	0.127
硝酸盐含量 Nitrate content	−0.946	−0.105	0.307

表 10 各处理综合得分和排序

Table 10 Comprehensive score and ranking under different treatments

处理 Treatment	Z_1	Z_2	Z_3	综合得分 Composite score	排序 Sort
T ₁	−3.16	−7.28	0.44	−3.34	4
T ₂	−0.92	0.26	0.24	−0.65	3
T ₃	3.29	5.88	−2.71	3.03	1
T ₄	0.79	2.75	1.12	1.08	2

x_3 为叶片数, x_4 为硬度, x_5 为单果鲜质量、 x_6 为单果干质量、 x_7 为含水率、 x_8 为果形指数、 x_9 为可溶性固形物含量、 x_{10} 为可溶性总糖含量、 x_{11} 为可滴定酸含量、 x_{12} 为糖酸比、 x_{13} 为 Vc 含量、 x_{14} 为可溶性蛋白含量、 x_{15} 番茄红素含量、 x_{16} 为硝酸盐含量。以各个成分相对应的方差贡献率作为权重, 由主成分得分和对应的权重线性求和即可得到指标的综合评价函数(综合得分: $Y=0.77 Z_1+0.13 Z_2+0.10 Z_3$), 依此计算出 4 个施钾量设施基质栽培下番茄生长及品质的综合得分和排序(表 10), 各处理得分表现为: $T_3>T_4>T_2>T_1$ 。说明施钾量增加 50% 处理(T_3)下的设施基质栽培番茄生长及品质最佳, 施钾量增加 75% 处理(T_4)次之。

3 讨 论

随着中国设施番茄栽培生产面积的不断扩大,

人们在番茄生产过程中施用肥料过程中存在极大的不合理性, 尤其在施用钾肥方面。为了追求更低的投入或更高的经济效益而过少或过量施用钾肥, 致使番茄整个生育期钾肥供应量不足或过量, 造成肥料利用效率较低^[23-25], 番茄品质及产量下降, 资源浪费。过量的施用肥料也会使肥料在土壤中积累, 对生态环境造成危害^[26-28]。针对不合理的肥料施用现状, 如何通过设施番茄中科学、合理地施用钾肥, 提高产量、改善品质是当今设施番茄栽培生产中亟待解决的问题^[24]。

3.1 施钾量对设施基质栽培番茄植株生长的影响

株高、茎粗等指标是番茄生长状况最为直观的反映。本研究中, 设施番茄植株株高、茎粗、叶片数经过不同施钾量处理后均呈现出不同程度的增长趋势, 其中 T_3 处理番茄植株的株高、茎粗最大, 显著高于 T_1 处理, 这可能是因为钾促进了番茄生长相

关酶的活性,进而加快植株生长。此结果与孟庆雪^[24]、杨玉珍等^[29]、李俊^[30]在番茄,以及曹永康等^[31]在辣椒上的研究结果一致。同时,根系活力是判断植株根系生理机能的重要指标,根系活力越强,根系对水分和营养物质的吸收能力越强^[32]。杨萍等^[25]研究发现,番茄根系活力随着施钾量的增大呈现先升高后降低的趋势,本研究结果与之相似,且以 T_3 处理下番茄植株根系活力最高,并显著高于 T_1 处理,说明适量施钾处理会促进番茄根系的生长,致使根系对肥料的吸收能力增强,进而进一步提高设施番茄植株根系活力。

3.2 施钾量对设施基质栽培番茄植株光合作用的影响

光合作用是作物产量形成的基础。本研究中设施番茄植株叶片光合色素经过不同施钾量处理后,含量整体呈上升趋势,这可能是由于钾是某些参与叶绿素合成酶的活化剂。钾素水平也可能因为影响了叶绿素与蛋白质的结合,使得叶片光合能力发生改变。王馨笙等^[33]研究发现,钾肥能够提高生姜叶片中叶绿素含量,本研究结果与之相似。同时,宁秀娟等^[34]在番茄研究中发现,增施钾肥可以显著提高植株叶片的净光合速率、气孔导度和胞间 CO_2 浓度。在本研究中,增施钾肥处理番茄叶片净光合速率、蒸腾速率、气孔导度较 T_1 处理都有不同程度的增加,这与其研究结论一致。另外,叶绿素荧光检测技术能够在植物体无损伤的情况下,从电子传递层面快速、灵敏地检测植物体光合生理状况,测定植物叶片的光合反应速率^[35]。在本试验中,随着施钾量的提高,番茄叶片 φ_{PSII} 、 F_v/F_m 、 qP 均表现出先升高后降低的趋势,并以 T_3 处理最高,而 NPQ 变化不显著,但仍以 T_3 处理下番茄叶片最低,说明在一定施钾量范围内,钾素能够提高植物对光能的利用效率,阻止过剩光能转化为热能,进而抑制植物光合作用下降。

3.3 施钾量对设施基质栽培番茄果实产量及品质的影响

本研究中, T_2-T_4 处理番茄单果重、果实产量均显著高于 T_1 处理,并以 T_3 处理单果重、产量最高,这与王剑锋^[35]、秦文利等^[36]在番茄上的研究结果相符,说明施用一定量钾肥能够促进植物体内有机物的积累,进一步提高番茄单果重、单株果数,从

而提高产量。同时,本试验中增施钾肥处理番茄果实硬度较 T_1 均有不同程度的提高,表明钾可能参与了果皮中的纤维素及果胶的合成,从而提高果实硬度,有利于果品贮藏和方便长距离运输。郎文培等^[37]在生菜研究中发现,增施钾肥可以提高生菜干物质的积累量。本研究也发现增施钾肥处理能显著提高设施番茄单果干质量,并以 T_3 处理番茄干质量最大,即钾肥可以提高番茄果实干物质的积累。另外,番茄果实中的可溶性固形物、可溶性总糖、可滴定酸、Vc、番茄红素、可溶性蛋白均是重要的品质指标。本试验研究表明,适量增施钾肥可以不同程度提高番茄果实中可溶性固形物、可溶性总糖、Vc、番茄红素含量,并以 T_3 处理增幅最大,但继续加大施钾量,番茄的品质和产量增幅会下降,这与常蕊^[38]、齐红岩等^[39]、韩启厚^[40]等在黄瓜、番茄上的研究结果一致,表明设施栽培番茄在施钾量增加 50% 条件下可以有效提高番茄的果实风味,且营养价值更高。可溶性蛋白是重要的营养物质,植物体内的可溶性蛋白可参与各种酶类代谢过程,同时易被人体所吸收利用,参与调节生理功能并为人体提供能量^[41]。在本研究中,各增施钾量处理均可以提高设施番茄果实内可溶性蛋白含量,并以 T_3 处理番茄果实可溶性蛋白含量最高,且显著高于 T_1 处理,这与苏苑君^[42]在生菜上的研究结果一致。

此外,果实中过多的硝酸盐不仅会对人类身体健康带来危害,也会给生态环境构成威胁。经实验检测结果证明,本研究中 T_3 处理番茄果实内硝酸盐含量均低于其他施肥处理,但高于不施肥对照,说明增施钾肥可以提高氮肥的利用率,进而降低果实内硝酸盐含量。

综上所述,在设施基质栽培条件下,番茄生长(株高、茎粗、根系活力)、光合(光合色素、光合参数、荧光参数)、品质(可溶性固形物、可溶性总糖、Vc、番茄红素等)、产量在一定的范围内随施钾量的增加而提高,一旦超过这个范围这种提高效应不仅不明显,而且还会减少。经综合评价发现, T_3 处理的得分最高,其次为 T_4 、 T_2 、 T_1 处理, T_1 处理得分最低。可见,在钾肥增量 50% 处理下,每次营养液中 K_2O 为 1.59 kg 时,较常量钾肥处理可显著促进番茄植株的生长,增加光合色素含量,进而促进叶片光合作用效率,改善番茄果实品质,提高产量。

参考文献:

- [1] 冀长泉. 番茄主要病毒病“siRNA 疫苗”的研制和应用 [D]. 山东泰安:山东农业大学, 2020.
- [2] 彭翠兰. 不同农艺措施对基质栽培番茄生理、果实产量和品质的影响 [D]. 新疆塔里木:塔里木大学, 2020.
- [3] LEVIN I, DE VOS C H R, TADMOR Y, *et al.* High pigment tomato mutants—more than just lycopene (a review) [J]. *Israel Journal of Plant Sciences*, 2006, **54**(3): 179-190.
- [4] FRASER P D, BRAMLEY P M. The biosynthesis and nutritional uses of carotenoids[J]. *Progress in Lipid Research*, 2004, **43**(3): 228-265.
- [5] 由天赋. 钾对番茄产量及品质的影响 [D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2002.
- [6] 郑新伟, 李 萍, 秦惠权, 等. 番茄栽培管理措施探讨 [J]. 现代农业科技, 2010, (4): 181, 183.
- ZHENG X W, LI P, QIN H Q, *et al.* Discussion on tomato cultivation and management measures[J]. *Modern Agricultural Sciences and Technology*, 2010, (4): 181, 183.
- [7] 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): 1 484-1 491.
- HA T, ZHANG X M, LI J S, *et al.* Effects of supply amounts and frequencies of nutrient solution on plant growth and fruit quality of highly sugary tomato[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2017, **26**(10): 1 484-1 491.
- [8] 李天来. 我国设施蔬菜科技与产业发展现状及趋势[J]. 中国农村科技, 2016, (5): 75-77.
- LI T L. Development status and trend of facility vegetable technology and industry in China[J]. *China Rural Science & Technology*, 2016, (5): 75-77.
- [9] 祁娟霞, 刘 馨, 赵小兵, 等. 不同灌水量和灌水频率对番茄植株生长、光合与荧光特性的影响[J]. 节水灌溉, 2017, (4): 50-56.
- QI J X, LIU X, ZHAO X B, *et al.* Effects of different irrigation amount and irrigation frequency on the growth, photosynthesis and fluorescence characteristics of tomato[J]. *Water Saving Irrigation*, 2017, (4): 50-56.
- [10] 周 博, 陈竹君, 周建斌. 水肥调控对日光温室番茄产量、品质及土壤养分含量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006, **34**(4): 58-62+68.
- ZHOU B, CHEN Z J, ZHOU J B. Effect of different fertilizer and water managements on the yield and quality of tomatoes and nutrient accumulations in soil cultivated in sunlight greenhouse [J]. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry* (Natural Science Edition), 2006, **34**(4): 58-62+68.
- [11] 马乔玲, 张 炎, 李青军, 等. 钾肥施用对加工番茄产量及效益的影响[J]. 新疆农业科学, 2013, **50**(11): 2 046-2 053.
- MA Q L, ZHANG Y, LI Q J, *et al.* Effect of potassium management on yield and benefit of processing tomato[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2013, **50**(11): 2 046-2 053.
- [12] 朱亚萍, 石孝均, 赵治书. 番茄配方施肥研究[J]. 西南农业大学学报, 1999, **21**(2): 54-57.
- ZHU Y P, SHI X J, ZHAO Z S. A study on specifically prescribed fertilization in tomato cultivation [J]. *Journal of Southwest Agricultural University*. 1999, **21**(2): 54-57.
- [13] 杨小燕, 卜玉山, 段小柱. 施钾对番茄产量和品质效应研究 [J]. 新疆农业科学, 2005, (4): 272-275.
- YANG X Y, BU Y S, DUAN X Z. Effects of potassium on the yield and quality of tomato[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*. 2005, (4): 272-275.
- [14] CORRÊA C V, DE SOUSA GOUVEIA A M, MARTINS B N M, *et al.* Effect of top-dressed potassium fertilization on the yield and quality of cucumber[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2018, **41**(10): 1 345-1 350.
- [15] LESTER G E, JIFON J L, MAKUS D J. Impact of potassium nutrition on postharvest fruit quality: Melon (*Cucumis melo* L) case study[J]. *Plant and Soil*, 2010, **335**(1/2): 117-131.
- [16] LESTER G E, JIFON J L, MAKUS D J. Supplemental foliar potassium applications with or without a surfactant can enhance netted muskmelon quality[J]. *HortScience*, 2006, **41**(3): 741-744.
- [17] 张 炎, 史军辉, 罗广华, 等. 新疆农田土壤养分与化肥施用现状及评价[J]. 新疆农业科学, 2006, **43**(5): 375-379.
- ZHANG Y, SHI J H, LUO G H, *et al.* The status and evaluation on soil nutrient and fertilization in Xinjiang[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2006, **43**(5): 375-379.
- [18] 刘瑞平. 营养液中不同 N、K 水平对基质栽培辣椒产量与品质的影响[D]. 山东泰安:山东农业大学, 2015.
- [19] 毛震宇, 顾建明, 何志学, 等. 缓释肥替代普通化肥对蒜苗生长、产量及品质的影响[J]. 中国蔬菜, 2020, (11): 66-71.
- MAO Z Y, XIE J M, HE Z X, *et al.* Effects of slow-released fertilizer instead of chemical fertilizer on growth, yield and quality of garlic seedlings[J]. *China Vegetables*, 2020, (11): 66-71.
- [20] 柳帆红, 肖雪梅, 郁继华, 等. 不同时段补光对日光温室番茄营养与风味品质的影响[J]. 西北农业学报, 2020, **29**(4): 570-578.
- LIU F H, XIAO X M, YU J H, *et al.* Effect of light supplementation in different periods on nutrition and flavor quality of tomato in solar greenhouse[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2020, **29**(4): 570-578.
- [21] 金 宁, 肖雪梅, 郁继华, 等. 不同品种番茄果实矿质元素含量评价[J]. 甘肃农业大学学报, 2020, **55**(4): 76-84.
- JIN N, XIAO X M, YU J H, *et al.* Evaluation on mineral element contents in fruits of different tomato varieties[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2020, **55**(4): 76-84.
- [22] 张 鹏. 基于主成分分析的综合评价研究 [D]. 南京:南京理工大学, 2004.
- [23] 何传龙, 马友华, 于红梅, 等. 减量施肥对保护地土壤养分淋失及番茄产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, **16**

(4); 846-851.

HE C L, MA Y H, YU H M, *et al.* Effect of reducing fertilizer application on soil nutrient leaching loss and tomato yield in plastic house[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, **16**(4): 846-851.

[24] 孟庆雪. 钾肥对番茄果实品质的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2019,(6): 54-58.

MENG Q X. Effect of potassium fertilizer on fruit quality of tomato [J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2019,(6): 54-58.

[25] 杨 萍, 李 杰, 王田涛, 等. 不同施钾水平对基质栽培番茄光合生理及产量的影响[C]//中国园艺学会第十三次全国会员代表大会暨 2017 年学术年会论文集. 昆明, 2017: 129.

[26] 唐 冬, 毛 亮, 支月娥, 等. 上海市郊设施大棚次生盐渍化土壤盐分含量调查及典型对应分析 [J]. 环境科学, 2014, **35**(12): 4 705-4 711.

TANG D, MAO L, ZHI Y E, *et al.* Investigation and canonical correspondence analysis of salinity contents in secondary salinization greenhouse soils in Shanghai suburb[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(12): 4 705-4 711.

[27] 王鹏程, 邵泽强, 薛大伟. 明确化肥施用现状 提高肥料使用效率[J]. 吉林农业, 2015, (24): 85.

WANG P C, SHAO Z Q, XUE D W. Clarify the current situation of chemical fertilizer application and improve the efficiency of fertilizer use[J]. *Agriculture of Jilin*, 2015,(24): 85.

[28] 袁丽金, 巨晓棠, 张丽娟, 等. 设施蔬菜土壤剖面氮磷钾积累及对地下水的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, **18**(1): 14-19.

YUAN L J, JU X T, ZHANG L J, *et al.* NPK accumulation in greenhouse soil and its effect on groundwater[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, **18**(1): 14-19.

[29] 杨玉珍, 孟超然, 张新疆, 等. 氮、钾肥用量对膜下滴灌加工番茄产量和品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017, (1): 61-67.

YANG Y Z, MENG C R, ZHANG X J, *et al.* Effect of nitrogen and potassium fertilizer on yield and quality of processing tomato under drip irrigation with plastic film mulching [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017,(1): 61-67.

[30] 李 俊. 亚低温及钾肥对温室番茄生理生态特性与营养吸收的影响 [D]. 陕西杨陵:西北农林科技大学, 2013.

[31] 曹永康, 颜建明, 何志学, 等. 钾肥水平对辣椒生长、品质和产量的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2018, **53**(6): 50-55, 63.

CAO Y K, XIE J M, HE Z X, *et al.* Effects of different potash fertilizer levels on the growth, quality and yield of pepper [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2018, **53**(6): 50-55, 63.

[32] 郑金亮. 日光温室早春茬番茄品种比较与综合评价 [D]. 河南新乡:河南科技学院, 2020.

[33] 王馨竺, 徐 坤, 杨天慧. 生姜对氮、磷、钾吸收分配规律研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, **16**(6): 1 515-1 520.

WANG X S, XU K, YANG T H. Absorption and distribution of nitrogen, phosphorus and potassium in ginger[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, **16**(6): 1 515-1 520.

[34] 宁秀娟, 余宏军, 蒋卫杰, 等. 不同钾水平对温室番茄生长、产量和品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2011, (6): 35-38.

NING X J, YU H J, JIANG W J, *et al.* Effects of different potassium levels applied at blooming stage on the growth, yield and quality of tomato in greenhouse[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2011,(6): 35-38.

[35] 王剑锋. 基质培番茄的钾素营养生理响应与快速检测技术研究 [D]. 北京:中国农业大学, 2016.

[36] 秦文利, 李春杰. 增施钾肥对日光温室番茄产量和品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2007, (1): 44-47.

QIN W L, LI C J. Effects of increasing potassium fertilizer dosage on the quality and yield of tomato in greenhouse[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2007,(1): 44-47.

[37] 郎文培, 艾绍英, 王朝辉, 等. 钾肥种类及用量对生菜生长和品质效应的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, **27**(5): 1 946-1 950.

LANG W P, AI S Y, WANG Z H, *et al.* Effect of different potassium fertilizers on lettuce's yield and quality[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, **27**(5): 1 946-1 950.

[38] 常 蕊. 亚适宜温光环境下增施钾肥对黄瓜生长、生理指标和产量的影响 [D]. 河南洛阳:河南科技大学, 2015.

[39] 齐红岩, 李天来, 陈元宏, 等. 叶面喷施磷酸二氢钾与葡萄糖对番茄光合速率和蔗糖代谢的影响[J]. 农业工程学报, 2005, **21**(S2): 137-142.

QI H Y, LI T L, CHEN Y H, *et al.* Effects of foliage applications of KH_2PO_4 and glucose on photosynthesis and sucrose metabolism of tomato[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, **21**(S2): 137-142.

[40] 韩启厚. 不同生育期施钾肥对温室番茄蔗糖代谢的调控 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2009.

[41] 刘 慧, 张静林, 刘杰超, 等. 施硒对樱桃番茄贮藏品质及 3 种活性氧代谢酶的影响[J]. 食品工业科技, 2019, **40**(24): 256-261.

LIU H, ZHANG J L, LIU J C, *et al.* Effects of selenium on cherry tomato storage qualities and involved three active oxygen metabolism related enzymes[J]. *Science and Technology of Food Industry*. 2019, **40**(24): 256-261.

[42] 苏苑君. 水培生菜营养液最佳配比与品质调控试验研究 [D]. 陕西杨陵:西北农林科技大学, 2016.

(编辑:裴阿卫)