中国农业大学学报 2024,29(8):213-222
Journal of China Agricultural University http://zgnydxxb.ijournals.cn

王春玲,王丹,宋卫堂,杨冬艳. 塑料大棚宜机化栽培模式对番茄生长及产量品质的影响[J]. 中国农业大学学报,2024,29(08):213-222.
WANG Chunling, WANG Dan, SONG Weitang, YANG Dongyan. Influence of plastic shed on the growth and yield quality of tomato under the suitable mechanized cultivation model[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(08): 213-222.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.08.18

塑料大棚宜机化栽培模式对番茄生长及产量品质的影响

王春玲[1,2] 王 丹[3] 宋卫堂[1] 杨冬艳[3*]

(1. 中国农业大学 水利与土木工程学院,北京 100083;
2. 塔里木大学 水利与建筑工程学院,新疆 阿拉尔 843300;
3. 宁夏农林科学院 园艺研究所,银川 750002)

摘 要 探讨宁夏地区塑料大棚宜机化种植模式对番茄植株生长和产量品质的影响效果。在大棚内采用不同垄距(190 cm (A1)和210 cm(A2))与不同密度(1 800株/667m^2(B1)、2 200株/667 m^2(B2)、2 500株/667 m^2(B3)),单(H1)、双(H2)行种植与不同密度组合的栽培方式分别进行2个茬口(2019年夏秋茬、2020年早春茬)的番茄种植,研究2种栽培模式下番茄的生长和产量品质特征。结果表明:垄距为190 cm时,番茄的生长及产量、品质等指标优于垄距210 cm;A1B1组合番茄产量、平均单果质量最高,分别为8 841 kg/667 m^2、171.8 g,比A2B1处理分别高35.3%和9.4%;当垄距相同时,低种植密度处理的番茄果实可溶性糖含量显著高于高种植密度。在垄距为190 cm条件下,进行单、双行栽培模式试验发现,在下午时段(15:00—17:00)单行西侧的番茄植株透光率最高,显著高于单行东侧和双行的东、西两侧;第1、2、3垄的单行东侧番茄透光率分别高于各垄双行东侧35.6%、20.3%、18.2%。单、双行种植模式番茄的产量呈现密度增加产量降低的趋势;当密度分别为B1、B2、B3时,单行产量比双行产量分别高12.8%、19.4%、10.2%;并且单行模式下番茄维生素C含量显著高于双行。综上,在宁夏地区塑料大棚内夏秋茬和早春茬番茄宜采用垄距为190 cm,密度为1 800株/667 m^{2}的单行种植模式。

关键词 番茄; 宜机化; 栽培模式; 产量; 品质

中图分类号 S641.2 **文章编号** 1007-4333(2024)08-0213-10 **文献标志码** A

Influence of plastic shed on the growth and yield quality of tomato under the suitable mechanized cultivation model

WANG Chunling[1,2], WANG Dan[3], SONG Weitang[1], YANG Dongyan[3*]

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;
2. College of Water Resources and Architecture Engineering, Tarim University, Alar 843300, China;
3. Institute of Horticultural Resources, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China)

Abstract In order to explore the effect of the plastic greenhouse suitable mechanized cultivation mode on tomato plant growth and yield quality in Ningxia region, different ridge and spacing distances (190 (A1), 210 cm (A2)) + different densities (1 800 (B1), 2 200 (B2), and 2 500 plants/667 m^2 (B3)), single (H1) and double (H2) row planting + different densities were designed. Cultivation was carried out for two stubbles (summer and fall stubble in 2019 and early spring stubble in 2020) to study the growth and yield quality characteristics of tomato under the two cultivation models. The results showed that the growth,

收稿日期: 2023-11-10
基金项目: 宁夏回族自治区科技创新领军人才资助项目(2021GKLRLX11);农业高质量发展和生态保护科技创新示范项目(NGSB-2021-04);国家大宗蔬菜产业技术体系(CARS-23-G23)
第一作者: 王春玲(ORCID:0009-0004-4730-7330),副教授,主要从事设施光环境调控及宜机化生产研究,E-mail: chunlingw130@163.com
通讯作者: 杨冬艳(ORCID:0000-0002-8862-981X),研究员,主要从事设施蔬菜栽培生理研究,E-mail:yangdongyan2000@163.com

yield, quality and quality of tomato were better at 190 cm spacing than those at 210 cm spacing. The yield and average single fruit weight of tomato were the highest (8 841 kg/667 m^2 and 171 g), which were 35.3% and 9.4% higher than those of the A2B1 treatment, respectively. When the spacing of row was the same, the soluble sugar content of tomato fruits at low planting densities was significantly higher than that of the high planting density treatment. Under the condition of 190 cm spacing of rows, the single and double row cultivation pattern test was carried out, and it was found that in the afternoon time (15:00-17:00) the tomato plants in the west side of the single row had the highest light transmittance, which was significantly higher than that in the east side of the single row and in the east and west sides of the double rows. The light transmittances of the tomatoes in the east side of the single row in the 1st, 2nd and 3th row were higher than that of the east side of the double row of the various row by 35.6%, 20.3% and 18.2%, respectively. The yield of tomato in single and double row planting mode showed the trend of decreasing yield with increasing density. When the densities were B1, B2 and B3, the yields of single-row planting were higher than that of double-row planting by 12.8%, 19.4% and 10.2%, respectively, and the VC content of tomato in single-row planting modes was significantly higher than that of double-row planting. In conclusion, the single-row planting pattern with the spacing of 190 cm and the density of 1 800 plants per 667 m^2 was suitable for summer-autumn and early-spring stubble tomatoes in plastic greenhouses in Ningxia.

Keywords tomato; mechanization; cultivation pattern; yield; quality

近年来我国蔬菜机械化的发展速度较快,目前总体机械化水平约40%,发展空间很大[1];而设施内农艺措施和种植模式的形成,基本没有考虑农机装备的作业需求,限制了设施蔬菜农机装备的作业效率[2]。因此,宜机化生产是目前研究和生产面临的重要问题。宋卫堂等[3]开展了塑料大棚和日光温室番茄机械化生产技术模式构建与验证,提出了"大垄距+宽沟窄畦"为特征的番茄宜机化栽培工艺,在塑料大棚内相邻两畦中心间距为180 cm,畦面宽度为60 cm的双行番茄种植模式。在温室内进行的宜机化栽培模式探讨中,陈真真等[4]提出在山东地区植株大行距140 cm、小行距40 cm,株距为30 cm的东西垄向种植的番茄产量最佳;在北京地区日光温室番茄机械化作业时可采用大行距100 cm,小行距40 cm,株距35 cm的东西向栽培模式[5]。杨冬艳等[6]研究了宁夏地区日光温室番茄宜机化生产,认为采用密度为30 000 株/hm^2,株距为33 cm的双行栽培模式能够获得较高的产量和品质。在种植密度的研究过程中发现,在设施内随密度增大番茄单株产量下降,但单位面积产量上升[7]。而大田玉米适当提高种植密度可以充分利用水资源,并提高玉米的产量获得较大的经济效益[8]。以上研究结果说明不同作物在不同地区、不同种植环境下合理的植株配置有一定差异。

在栽培模式探讨过程中,齐军航等[9]关注了植株冠层和群体的光环境变化会影响作物的生长发育和产量品质,发现消光系数越小群体光照截获率越高,越有利于增加光合产物和干物质积累,且株距为45和50 cm时黄秋葵的产量最高。不同密度及株行距配置对大田的玉米、棉花、大豆等作物的冠层光照特性、群体结构都有不同程度的影响,进而影响了产量的形成[10-12]。在设施内宜机化栽培模式探讨中,宋卫堂等[13]发现在散射膜条件下,东西与南北垄向番茄冠层的光照累积量无显著性差异,垄向对番茄的生长和产量没有产生影响。当垄距在1.8 m,密度为3.3株/m^2的温室番茄东西垄向双行宜机化栽培模式中,不同垄的番茄行间透光率由北向南逐渐升高,同一垄上南侧行番茄群体的透光率较北侧高50%[14]。Zhang等[15]采用GroIMP开源软件建立了基于FSPM(植物功能结构模型)的番茄植株配置虚拟仿真模型,发现东西朝向具有较好的总光截获率,但光照均匀性不足。以上研究说明不同地区和生产条件下的适宜的栽培模式有一定差异。

目前,宜机化生产模式的探讨主要集中在日光温室的番茄株行距、密度参数以及植株配置对作物群体冠层的影响,且多以双行种植为主,少见单行种植。因此,本研究在不同垄距、密度及单、双行的种植模式下,对番茄生长、产量品质及植株群体透光率进行测定和分析,旨在明确栽培模式对塑料大棚番茄生产的影响,以期为宁夏地区塑料大棚番茄宜机化栽培模式的研究提供依据。

1　材料与方法

1.1　试验场地及材料

试验地点位于宁夏银川市兴庆区掌政镇五渡桥村（东经106°28′，北纬38°48′），试验塑料大棚参数：南北向长76.0 m，东西向跨度15.5 m，脊高5.0 m，大棚中间设走道，宽度1.0 m。夏秋茬试验于2019-06—2019-10，定植日期为2019-06-18。早春茬试验于2020-03—2020-06，定植日期为2020-03-09。试验番茄品种为‘丰硕228’。单干整枝，5穗果后打顶，统一管理。

1.2　试验设计

夏秋茬设置栽培垄距和密度水平2个因素的双行栽培模式，其中垄距为190 cm（A1）和210 cm（A2）；密度水平为1 800株/667 m²（B1）、2 200株/667 m²（B2）、2 500株/667 m²（B3）。早春茬垄距采用190 cm，设置栽培行数和密度水平2个因素，其中行数为单行（H1）、双行（H2）；密度水平同夏秋茬。每个茬口6个处理，每个处理4垄，从东至西编号依次为：第1垄、第2垄、第3垄和第4垄，每垄长12 m。每个处理重复3次。

1.3　测定指标及方法

1.3.1　生长发育指标

定植后50天测量生长指标，每个处理在选择长势一致的植株标记。使用刻度尺测量植株株高；使用游标卡尺测量植株茎粗；并记录叶片数。

1.3.2　光照指标

为比较单、双行种植模式的光照环境差异，对早春茬种植的番茄于2020-06-12（晴天）下午，使用CI-110植物冠层分析仪测量不同处理植株的冠层不同位置的透光率。CI-110植物冠层分析仪可以通过捕获广角范围内的植物冠层图像，估算出透光率等指标。具体测量方法为：每处理选择6株植株，在每个植株距地面1 m处的东、西两侧进行测量，同一时间内重复3次；为避免时间差异导致的结果误差，以往返形式再次进行3次重复测量，数据取测量时段内（15:00—17:00）的平均值。

1.3.3　产量、品质指标

记录各处理的小区内每次采收果实数和果重；选取第3穗成熟度一致的果实测定品质。果实采用四分法取样测量，其中可溶性糖含量采用蒽酮比色法，可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝G-250染色法，有机酸含量采用酸碱滴定法，维生素C含量采用2,6-二氯靛酚法测定[16]。

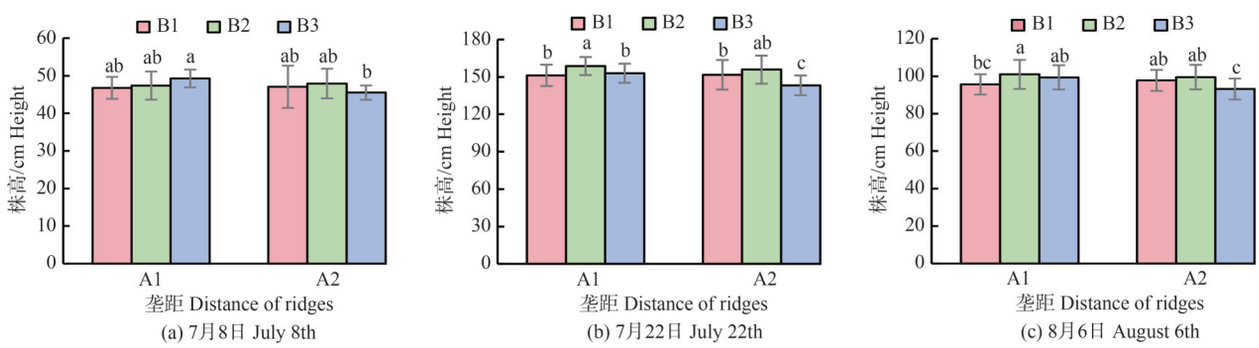
1.4　数据处理

数据结果采用SPSS20软件进行数据分析，处理间差异性分析采用Duncan's多重比较进行，显著性水平为$P<0.05$；图形绘制采用Excel 2016。

2　结果与分析

2.1　垄距和密度对番茄生长的影响

图1示出不同垄距和密度条件下番茄在不同时期下的株高，垄距为190 cm（A1）时番茄株高生长优于垄距为210 cm（A2），且垄距对番茄株高的影响随时间的变化较小。当种植密度为2 500株/667 m²



A1和A2分别表示垄距为190和210 cm；B1、B2和B3分别表示密度为1 800、2 200和2 500株/667m²。柱上不同字母表示处理间差异显著（$P<0.05$），相同字母表示差异不显著（$P>0.05$）。下图同。

A1, A2 represents the distance of ridges was 190 cm, 210 cm, respectively. B1, B2 and B3 represents the densities of 1 800, 2 200 and 2 500 plants per 667 m², respectively. Within the same bar chart, different letters represent significant differences ($P<0.05$), while the same letters represent no significant differences ($P>0.05$). The same below.

图1　不同垄距和密度条件下番茄在不同时期的株高

Fig.1　Plant height of tomato under different ridge spacing and density conditions at different periods of time

(B3)时,在7月8日、7月22日、8月6日A1B3的株高分别为49.3、99.4和153.0 cm,均显著高于A2B3的45.5、93.2、143.3 cm。从株高生长速度看,当种植密度为2 200株/667 m²(B2)时,株高的生长速度较其他密度快。在8月6日,垄距为190 cm时,A1B2的株高显著高于A1B1(5.0%)和A1B3(3.7%)。此结果表示,适宜的种植密度,有利于提高植株在苗期的生长速度,当密度过大或过小均不利于植株的生长,这有可能与环境因素,如空气温湿度、光照条件等有关。

种植密度为1 800株/667 m²(B1)时,垄距对番茄茎粗生长的影响不显著;当垄距一定时,种植密度为B1的番茄茎粗最高且显著高于密度为B2和B3(图2)。在7月22日,垄距为190 cm时,A1B1处理的番茄茎粗最高,比A1B2和A1B3分别高16.5%和6.7%。垄距为210 cm时,茎粗也表现出相似的趋势。但番茄植株茎粗不会随着种植密度的增加而降低。

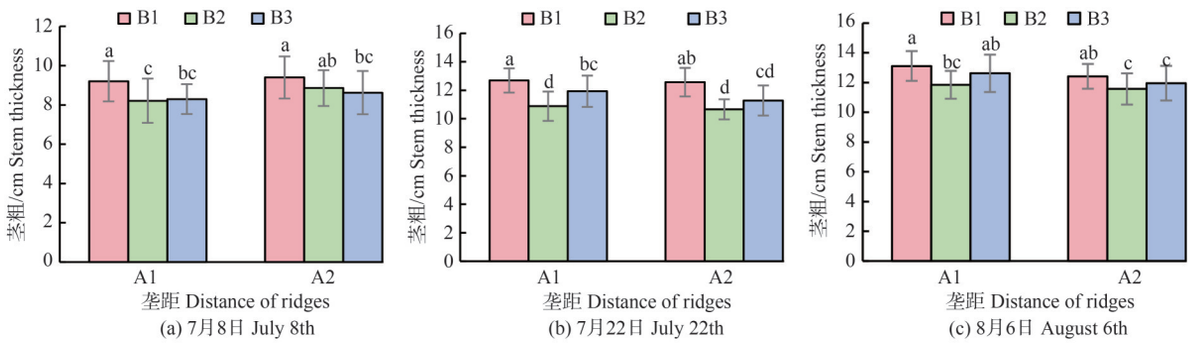


图2 不同垄距和密度条件下番茄在不同时期下的茎粗

Fig.2 Stem thickness of tomato under different ridge spacing and density conditions at different periods of time

图3示出不同垄距和密度条件下番茄在不同时期下的叶片数,当种植密度为A1和A2时,垄距对于番茄叶片数无显著性影响。垄距为190 cm,3个种植密度对番茄叶片数无显著性影响;当垄距为210 cm时,A2B3处理的番茄叶片数显著低于A2B1或A2B2。以上结果表示A3B3处理不利于番茄叶片数的增长。通过以上结果分析,发现适宜的垄距和种植密度,有利于植株在苗期的生长。

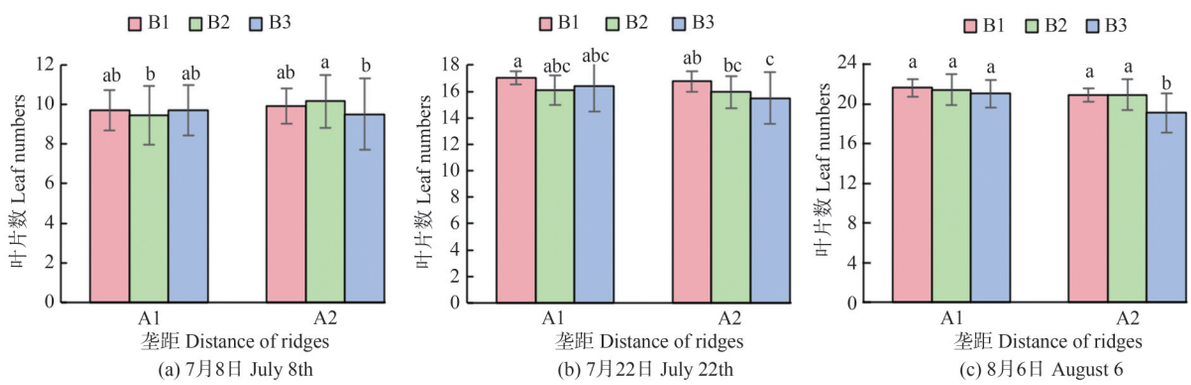


图3 不同垄距和密度条件下番茄在不同时期下的叶片数

Fig.3 Leaf number of tomato under different ridge spacing and density conditions at different periods of time

2.2 垄距和密度对番茄产量和单果质量的影响

番茄产量对垄距因素响应显著(图4),种植密度为B1和B2条件下,垄距为190 cm,番茄产量显著高于210 cm垄距。A1B1的番茄产量在所有处理中最高,为8 841 kg/667 m²,比A2B1高35.3%;A1B2产量为8 438 kg/667 m²,比A2A2高20.9%。垄距为190 cm,3个种植密度处理的番茄产量差异不显著。当垄距为210 cm时,A2B3的番茄产量为7 782 kg/667 m²,显著高于A2B1、A2B2,增幅分别为26.5%和14.2%。表示当垄距变大时,种植密度

提高有利于产量的形成。

从单果质量变化看，垄距和密度因素均对番茄单果质量产生显著影响。在相同垄距条件下，种植密度小的番茄单果质量显著大于密度大的单果质量；例如，A1B1单果质量显著高于A1B2、A1B3，增幅为14.6%和12.7%。在相同密度条件下，番茄单果质量在垄距为190 cm时下显著优于210 cm垄距，A1B1为171.8 g比A2B1高9.4%。两方面都体现在番茄的株距上，扩大株距能够促进番茄单果质量的增加。

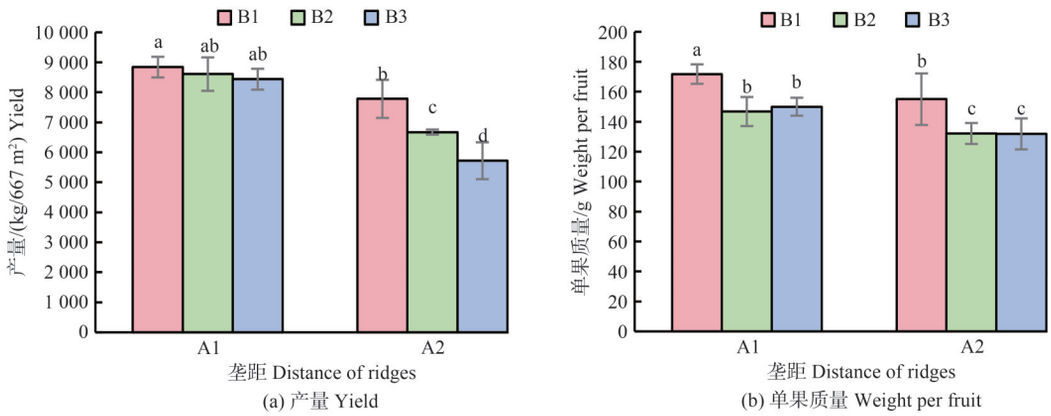


图4　不同垄距和密度条件下番茄的产量和单果质量

Fig.4　Yield and single fruit weight of tomato under different ridge spacing and density conditions

2.3　垄距和密度对番茄品质的影响

垄距和种植密度对番茄的可溶性蛋白和维生素C含量无显著性影响，但对其他品质指标影响显著（表1）。垄距相同时，低种植密度番茄果实的可溶性糖含量显著高于高种植密度处理。如：A1B1的可溶性糖含量显著高于A1B2和A1B3，分别提高

表1　不同垄距和密度条件下番茄的果实品质

Table 1　Fruit quality of tomato under different ridge spacing and density conditions

垄距 Ridge spacing	种植密度/(kg/667m²) Planting density	w(可溶性糖)/(mg/g) Soluble sugar content	w(总酸)/(mg/g) Total acid content	糖酸比 Sugar-acid ratio	w(可溶性固形物)/% Soluble solids content	w(可溶性蛋白)/(mg/g) Soluble protein content	w(维生素C)/(mg/100g) vitamin C content
A1	B1	30.63±1.54 ab	4.78±0.45 ab	6.45±0.85 b	5.40±0.34 b	0.56±0.03 a	17.48±0.67 a
	B2	27.13±2.57 c	4.51±0.42 bc	6.13±0.85 b	5.06±0.23 cd	0.57±0.05 a	16.35±1.18 a
	B3	27.77±2.50 c	5.11±0.29 ab	5.44±0.46 b	4.86±0.21 d	0.55±0.07 a	17.40±2.05 a
A2	B1	31.41±3.91 a	3.91±1.02 c	8.27±0.98 a	5.83±0.34 a	0.66±0.17 a	17.85±2.16 a
	B2	29.18±2.31 bc	4.73±0.32 b	6.14±0.41 b	5.22±0.30 bc	0.53±0.03 a	18.46±2.01 a
	B3	28.39±1.11 c	5.44±0.51 a	5.27±0.62 b	5.21±0.14 bc	0.60±0.12 a	17.33±1.15 a

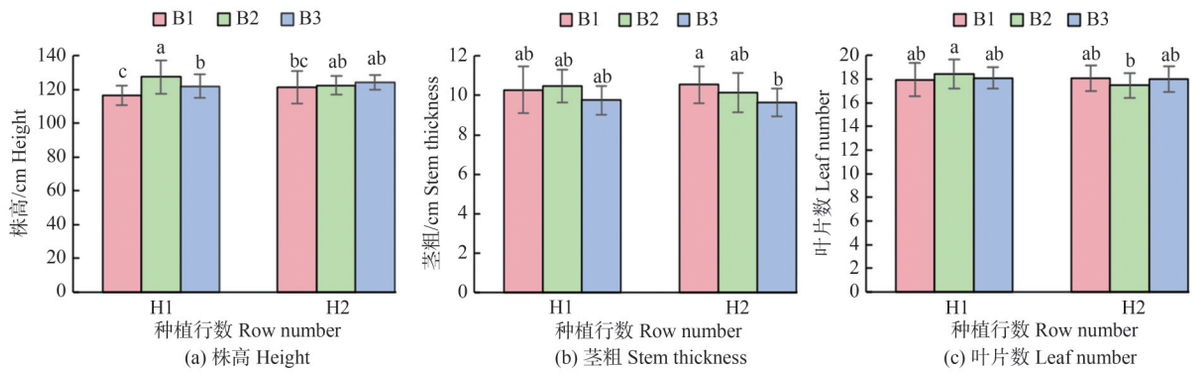
注：A1和A2分别表示垄距为190和210 cm；B1、B2和B3分别表示密度为1 800、2 200和2 500株/667m²。同列数据不同字母表示差异显著（$P<0.05$），相同字母表示差异不显著（$P>0.05$）。下表同。

Note: A1, A2 represents the distance of ridges was 190 cm, 210 cm, respectively. B1, B2 and B3 represents the density was 1 800, 2 200 and 2 500 plants/667m², respectively. Within the same column, different letters represent significant differences ($P<0.05$), while the same letters represent no significant differences ($P>0.05$). The same below.

了11.4%和9.3%;同理A2B1的可溶性糖含量也显著高于A2B2和A2B3。A2B1的可溶性糖含量、糖酸比、可溶性固形物的含量在所有处理中最高,总酸含量最低,且与其他处理差异显著。当密度为B1时,A2B1处理的番茄糖酸比和可溶性固形物的含量显著高于A1B1,分别提高了22.0%和7.4%。可见增加垄距、降低种植密度可有效改善果实品质中的可溶性糖含量、糖酸比、可溶性固形物含量。

2.4 单双行种植模式与种植密度对番茄生长的影响

基于夏秋茬试验结果,2020年早春茬以190 cm的垄距进行种植试验,分析单(H1)、双行(H2)种植模式和不同种植密度对番茄生长的影响。相同密度条件下,种植行数对番茄植株的生长无显著性影响(图5)。当番茄以单行模式栽培时,H1B2的株高为127.4 cm,显著高于H1B1和H1B3,其增幅为9.4%和4.3%。当番茄以双行模式进行种植时,各密度处理下,番茄株高无显著性差异。番茄的茎粗在不同种植行数及种植密度处理下,均无显著性差异。当密度为B2时,H1B2的叶片数显著高于H2B2,增幅为5.2%;其他处理之间的叶片数无显著性差异。



H1和H2分别表示种植行数为单行和双行,图6同。

H1 and H2 represents the row number was single row、double row, respectively. The same as Fig. 6.

图5 不同种植行数和密度条件下番茄的株高、茎粗和叶片数

Fig.5 Height, stem thickness and leaf number of tomato under different row number and density

2.5 单双行种植模式与密度对番茄光照的影响

透光率可以反应植株冠层群体截获光量的水平,表2示出种植密度为1 800株/667 m^2,单、双行不同垄在2020-06-12番茄植株群体的透光率。可见,在下午时植株透光率的整体变化规律是西侧高于东侧,且单行高于双行。单行西侧的番茄植株透光率最高,显著高于单行东侧和双行的东、西两侧。如在第2垄的单行西侧的透光率为0.37,比双行西侧、单行东侧、双行东侧分别高43.2%、51.4%、74.2%。除第4垄外,第1、2、3垄的单行东侧番茄透光率分别高于各垄双行东侧35.6%、20.3%、18.2%。

表2 不同种植行数各垄东西侧番茄群体的透光率

Table 2 Light transmittance of tomato population on the east and west sides of each ridge under different row number

垄的编号 Number of ridges	单行西侧 West side of single row	双行西侧 West side of double row	单行东侧 West side of single row	双行东侧 West side of double row
第1垄 The 1st ridge	0.37±0.03 a	0.15±0.01 c	0.23±0.03 b	0.15±0.03 c
第2垄 The 2nd ridge	0.37±0.02 a	0.21±0.0 ba	0.18±0.02 c	0.14±0.02 c
第3垄 The 3rd ridge	0.34±0.03 a	0.25±0.01 b	0.22±0.02 c	0.18±0.01 c
第4垄 The 4th ridge	0.31±0.03 a	0.24±0.02 b	0.20±0.01 c	0.23±0.02 b

2.6　单双行种植模式与密度对番茄产量的影响

单、双行种植模式与密度对番茄产量有显著的影响，且呈现密度增加产量降低的趋势（图6）。如单行种植模式下，H1B1的产量最高（5 666 kg/667 m²），比H1B2、H1B3分别高3.4%、15.6%。种植密度相同时，单行种植模式的产量显著高于双行，其中H1B1、H1B2、H1B3的产量比H2B1、H2B2、H2B3分别高12.8%、19.4%、10.2%。单行种植模式对番茄的单果质量有显著性影响，随着密度的增加单果质量增加。种植株数少的条件下获得高产，可能是单行种植模式改善了番茄植株受光条件增加坐果数所致。

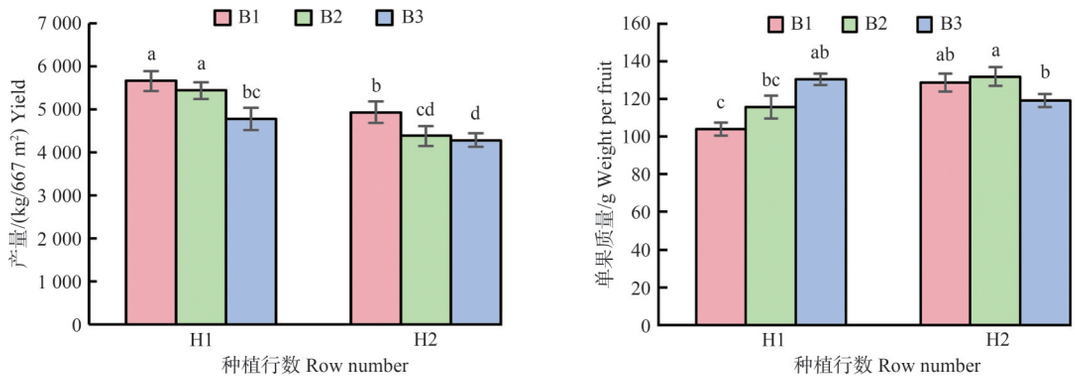


图6　不同种植行数和密度条件下番茄的产量和单果质量

Fig.6　Yield and single fruit weight of tomato under the different row number and density conditions

2.7　单双行种植模式与密度对番茄品质的影响

单双行种植模式与密度对番茄果实品质构成中不同指标的影响程度有差异（表3）。行数对可溶性糖、可溶性固形物、可溶性蛋白影响较小。但当密度为B3时，H1B3的可溶性糖含量显著低于H2B3，降低幅度为14.0%。种植模式对番茄果实中总酸和维生素C的含量影响显著，单行模式下，密度处理对果实总酸和维生素C含量产生显著性影响，且维生素C含量随着密度增加含量升高，其中H1B3的维生素C含量为所有处理最高。双行种植模式下，维生素C含量也随着密度增加含量升高，但均低于单行种植模式。可溶性蛋白受种种植行数和密度的影响较小，含量较为稳定；可溶性糖、总酸变化规律不明显；维生素C含量则随着密度增加显

表3　不同种植行数与密度条件下番茄的果实品质

Table 3　Fruit quality of tomato under the different row number and density conditions

种植行数 Row number	种植密度/(kg/667m²) Planting density	w(可溶性糖)/(mg/g) Soluble sugar content	w(总酸)/(mg/g) Total acid content	糖酸比 Sugar-acid ratio	w(可溶性固形物)/% Soluble solids content	w(可溶性蛋白)/(mg/g) Soluble protein content	w(维生素C)/(mg/100g) Vitamin C content
H1	B1	42.68±1.79 b	3.75±0.10 d	11.35±0.20 ab	5.9±0.11 bc	0.81±0.03 a	22.37±0.19 c
	B2	43.83±1.51 ab	3.99±0.05 b	10.98±0.42 bc	6.45±0.05 a	0.75±0.06 ab	23.18±0.14 b
	B3	42.38±1.92 b	3.86±0.02 c	10.96±0.54 bc	5.83±0.36 c	0.70±0.05 b	24.57±0.07 a
H2	B1	43.45±1.96 ab	4.15±0.12 a	10.45±0.51 c	6.00±0.09 bc	0.73±0.04 ab	17.62±0.10 e
	B2	45.74±1.38 a	3.89±0.09 c	11.76±0.39 a	6.06±0.05 b	0.68±0.02 b	17.81±0.10 e
	B3	36.43±0.78 c	3.83±0.09 cd	9.50±0.24 d	5.88±0.07 bc	0.66±0.06 b	18.82±0.18 d

注：H1和H2表示种植行数为单行和双行。

Note: H1 and H2 represents the row number was single row、double row, respectively.

著上升,且单行种植有利于维生素C含量的增加。

3 讨 论

3.1 垄距和密度对番茄生长及产量品质的影响

作物不同株行距配置改变了植株个体的局部生长环境,进而使植株个体形态发生变化[12]。本研究结果显示,垄距为190 cm的植株高度整体高于垄距为210 cm,且在种植密度为2 200株/667 m^2的条件下植株的株高最高,但是密度为1 800株/667 m^2的条件下,植株的茎粗最大。随着垄距加大、株距缩小植株个体之间的竞争激烈,营养分配失调;且行距加大植株的光照截获率降低[11]。有研究表明,作物的产量与光能截获率呈显著正相关[17],且高产田的作物植株群体的光能利用率有显著提高[18]。本研究发现垄距为210 cm的番茄产量低于垄距为190 cm,且A1B1的产量显著高于A1B2和A1B3,这一结果表明垄距过大、密度过大均不利于番茄产量的形成。番茄群体内部太阳辐射量受植株密度及高度影响,种植密度越大,透光性越差,但种植密度太小,光能利用率下降[19]。过高的密植水平则易造成不合理的群体光分布,引起群体郁蔽,限制植株光合性能[20]。而光照条件的变化会影响番茄果实品质,有研究表示:遮光处理下番茄果实内蔗糖含量较正常光照低30%[21],番茄果实中的VC、可溶性糖、可溶性固形物的含量会随着光照强度的增加而增加,有机酸含量降低[19]。本研究结果显示:当垄距相同时,低种植密度番茄果实的可溶性糖含量显著高于高种植密度处理,其中A1B1的可溶性糖含量显著高于A1B2和A1B3,分别提高了11.4%和9.3%;这一结果表明适宜的低密度种植,可以改善番茄群体的光照条件,从而有利于番茄果实品质的形成。

3.2 单双行种植模式对番茄光环境及产量品质的影响

在种植密度相同的条件下,单行种植的番茄植株群体透光率高于双行种植。植株上部有较高的透光率利于中下部获得更多的光能截获,延缓冠层叶片衰老进程[22-23]。在相同密度下单行种植在一定程度上缩小了植株间距,但两行之间间距增加,可以提高单个植株的光照条件。扩行缩株可以通过优化田间分布,改善冠层光合群体结构,获得增产,这在大田玉米栽培中也得到了验证[24,10]。本研究中,下午时段植株群体的透光率是西侧高于东侧,且单行高于双行。在产量形成过程中,相同密度条件下,单行种植模式产量显著高于双行模式;且相同种植模式下,密度为B1(1 800株/667 m^2)条件的番茄产量显著高于B2和B3。这一结果可能的原因是单行模式植株群体的透光率高,光照条件优于双行模式,提高了植株整体的光能利用率。群体辐射透过率适宜,既保证了群体光合速率的提高,又使中下部叶片受光良好,降低了下层叶片因光照不足而造成的衰老,为后期产量形成提供保障[9]。单、双行种植模式下,番茄果实品质指标中可溶性糖含量、糖酸比最小的处理为H2B2,表明密度过大的双行种植不利于果实糖分的累积和风味的形成。双行种植模式下果实维生素C的含量显著低于单行模式,这可能是弱光环境加剧了维生素C的氧化以及维生素C合成路径受到弱光信号的抑制[25],即弱光导致番茄产量和品质降低[26]。

4 结 论

本研究利用改变番茄不同垄距、密度和单双行的种植模式,分析不同配置的栽培模式对番茄生长、产量品质及光环境的影响,来探索适宜于宁夏地区塑料大棚番茄宜机化生产的合理参数。主要结论如下:1)垄距为190 cm时,番茄的生长及产量、品质指标优于垄距为210 cm;2)垄距190 cm+密度1 800株/667 m^2处理下番茄的产量、单果质量最高;低种植密度番茄果实的可溶性糖含量显著高于高种植密度;3)在垄距为190 cm条件下,下午时段单行西侧的番茄植株透光率最高,显著高于单行东侧和双行的东、西两侧;4)单、双行种植模式番茄的产量呈现密度增加产量降低的趋势;且种植密度相同时,单行产量显著高于双行,同时单行模式下番茄果实VC含量显著高于双行。综上,在宁夏地区塑料大棚内夏秋茬和早春茬番茄宜采用垄距为190 cm,密度为1 800株/667 m^2的单行种植模式。

参考文献 References

[1] 陈永生. 设施蔬菜产业发展(二)2022—2023年中国蔬菜机械化发展概况[J]. 中国蔬菜,2023(10):5-10
Chen Y S. Facility vegetable industry development (2) Development of vegetable mechanization in China from 2022 to 2023[J]. *China Vegetable*, 2023(10):5-10 (in Chinese)

[2] 宋卫堂, 李明. 以"农艺-农机-设施"深度融合推动设施园艺高效发展[J]. 农业工程技术, 2020, 40(1): 44-47

Song W T, Li M. Promoting the efficient development of protected horticulture with the deep integration of agronomy, agricultural machinery and facilities[J]. *Agricultural Engineering Technology*, 2020, 40(1): 44-47 (in Chinese)

[3] 宋卫堂，李明，宋坚利，王平智. 基于"农艺-农机-设施"融合的设施番茄机械化生产技术模式构建与验证[J]. 农业工程技术，2022，42(4)：47-50
Song W T, Li M, Song J L, Wang P Z. Construction and verification of mechanized production technology model of protected tomato based on "agronomy-agricultural machinery-facilities"[J]. *Agricultural Engineering Technology*, 2022, 42(4): 47-50(in Chinese)

[4] 陈真真，李仪曼，栾恒，许良鹤，胡泓，魏珉. 垄向和株行距配置对日光温室番茄生育及产量的影响[J]. 山东农业科学，2022，54(3)：63-67
Chen Z Z, Li Y M, Luan H, Xu L H, Hu H, Wei M. Effects of ridge direction and plant and row spacing on growth and yield of tomato in solar greenhouse[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2022, 54(3): 63-67 (in Chinese)

[5] 李治国，闫子双，杨立国，李传友，李宗煦，刘晓明. 农机农艺融合的日光温室番茄栽培模式试验研究[J]. 中国农机化学报，2021，42(6)：55-59
Li Z G, Yan Z S, Yang L G, Li C Y, Li Z X, Liu X M. Experimental study on tomato cultivation mode in solar greenhouse based on integration of agricultural machinery and agronomy [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2021, 42(6): 55-59 (in Chinese)

[6] 杨冬艳，桑婷，冯海萍，王蓉，马玲. 种植密度对日光温室东西垄向栽培番茄产量构成及光环境的影响[J]. 河南农业科学，2021，50(5)：99-106
Yang D Y, Sang T, Feng H P, Wang R, Ma L. Effects of planting density on yield composition and light environment of east-west ridge of tomato in greenhouse[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2021, 50(5): 99-106 (in Chinese)

[7] 杨丽丽，王一鸣，董乔雪，康孟珍. 基于结构功能模型实现番茄植株产量优化[J]. 中国农业大学学报，2008，13(1)：71-76
Yang L L, Wang Y M, Dong Q X, Kang M Z. Optimization of fruit set and yield of tomatio using the functional-structural model[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2008, 13(1): 71-76 (in Chinese)

[8] 白杜娟，邹超煜，白岗栓，池利刚，张俊，边利军. 河套灌区玉米不同种植密度对田间耗水及产值的影响[J]. 中国农业大学学报，2023，28(8)：52-64
Bai D J, Zou C Y, Bai G S, Chi L G, Zhang J, Bian L J. Effects of different planting densities of maize on field water consumption and output value in Hetao irrigation area[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(8): 52-64 (in Chinese)

[9] 齐军航，聂师豫，张晓明，程艳. 种植密度对黄秋葵群体冠层结构及产量的影响[J]. 东北农业科学，2023，48(04)：102-105，112
Qi J H, Nie S Y, Zhang X M, Cheng Y. Effects of planting density on population structure and yield of okra [J]. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*. 2023，48(04)：102-105，112 (in Chinese)

[10] 张美微，李川，张盼盼，牛军，郭涵潇，何佳雯，刘京宝，乔江方. 错株密植对夏玉米冠层特性和产量的影响[J]. 中国农业大学学报，2023，28(5)：34-43
Zhang M W, Li C, Zhang P P, Niu J, Guo H X, He J W, Liu J B, Qiao J F. Effects of staggered and close planting on canopy characteristic and yield of summer maize[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(5): 34-43 (in Chinese)

[11] 刘帅，崔爱花，李永旗，李直兴，谢业涛，余进祥，李亚兵. 密度与播期互作下棉花冠层PAR时空特征分析[J]. 核农学报，2020，34(11)：2614-2622
Liu S, Cui A H, Li Y Q, Li Z X, Xie Y T, Yu J X, Li Y B. The photosynthetic active radiation spatiotemporal characteristic analysis of cotton canopy at interactions between planting density and sowing date[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2020, 34(11): 2614-2622 (in Chinese)

[12] 周勋波，杨国敏，孙淑娟，陈雨海. 不同株行距配置对夏大豆群体结构及光截获的影响[J]. 生态学报，2010，30(3)：691-697
Zhou X B, Yang G M, Sun S J, Chen Y H. Effect of different plant-row spacing on population structure and PAR interception in summer soybean[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(3): 691-697 (in Chinese)

[13] 宋卫堂，李晨曦，孙旭光，王平智，赵淑梅. 散射膜日光温室中种植垄向对番茄生长和产量的影响[J]. 农业工程学报，2017，33(24)：242-248
Song W T, Li C X, Sun X G, Wang P Z, Zhao S M. Effects of ridge direction on growth and yield of tomato in solar greenhouse with diffuse film[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(24): 242-248 (in Chinese)

[14] 杨冬艳，王丹，桑婷，赵云霞，宋卫堂. 日光温室番茄东西垄向模式下群体光环境及产量分布特征[J]. 中国农机化学报，2023，44(9)：51-58
Yang D Y, Wang D, Sang T, Zhao Y X, Song W T. Characteristics of group light environment and yield distribution of tomato under east-west ridge pattern in solar greenhouse[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2023, 44(9): 51-58 (in Chinese)

[15] Zhang Y, Henke M, Li Y M, Xu D M, Liu A H, Liu X G, Li T L. Analyzing the impact of greenhouse planting strategy and plant architecture on tomato plant physiology and estimated dry matter[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 828252

[16] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京：高等教育出版社，2000
Li H S. *Principles and Techniques of Plant Physiological Biochemical Experiment*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000 (in Chinese)

[17] 欧桂宁，贝丽萍，张静柔，韩笑，彭晓辉，黎亮武，阳太亿，黄苑航，韦茂贵. 木薯不同叶形及叶片着生姿态对光能利用效率的影响[J/OL]. 分子植物育种：1-21. 2024-01-21. https://kns. cnki. net/kcms2/detail/46. 1068. S. 20230529. 0910. 002. html
Ou G N, Bei L P, Zhang J R, Han X, Peng X H, Li L W, Yang T Y, Huang Y H, Wei M G. Effects of the leaf shape and growth posture on light use efficiency of cassava[J/OL]. *Molecular Plant Breeding*: 1-21. 2021-01-2. https://kns. cnki. net/kcms2/detail/46. 1068. S. 20230529. 0910. 002. html (in Chinese)

[18] 吴希，王家瑞，郝淼艺，张宏军，张仁和. 种植密度对不同生育期玉米品种光温资源利用率和产量的影响[J]. 作物学报，2023，49(4)：1065-1078
Wu X, Wang J R, Hao M Y, Zhang H J, Zhang R H. Effects of planting density on solar and heat resource utilization and yield of maize varieties at different growth stages[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2023, 49(4): 1065-1078 (in Chinese)

[19] 周怀兵，蒋芳玲，胡根金，徐为圣，王东，吴震. 定植密度和单株留果穗数对春季大棚大果型番茄植株生长及产量和品质的影响[J]. 江苏农业学报，2013，29(3)：626-632
Zhou H B, Jiang F L, Hu G J, Xu W S, Wang D, Wu Z. Effects of planting density and remaining fruit cluster per plant on growth, yield and quality of large fruit tomato varieties in plastic greenhouse in spring[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2013, 29(3): 626-632 (in Chinese)

[20] 吕丽华，陶洪斌，夏来坤，张雅杰，赵明，赵久然，王璞. 不同种植密度下的夏玉米冠层结构及光合特性[J]. 作物学报，2008，34(3)：447-455
Lv L H, Tao H B, Xia L K, Zhang Y J, Zhao M, Zhao J R, Wang P. Canopy structure and photosynthesis traits of summer maize under different planting densities[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(3): 447-455 (in Chinese)

[21] 赵玉萍，邹志荣，杨振超，胡晓辉，白鹏威，李鹏飞，任雷. 不同温度和光照对温室番茄光合作用及果实品质的影响[J]. 西北农林科技大学学报：自

然科学版, 2010, 38(5): 125-130
Zhao Y P, Zou Z R, Yang Z C, Hu X H, Bai P W, Li P F, Ren L. Effect of temperature and light to tomato photosynthesis and quality in greenhouse[J]. *Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition*, 2010, 38(5): 125-130 (in Chinese)

[22] Gou L, Xue J, Qi B Q, Ma B Y, Zhang W F. Morphological variation of maize cultivars in response to elevated plant densities [J]. *Agronomy Journal*, 2017, 109(4): 1443-1453

[23] 胡旦旦, 张吉旺, 刘鹏, 赵斌, 董树亭. 密植条件下玉米品种混播对夏玉米光合性能及产量的影响[J]. 作物学报, 2018, 44(6): 920-930
Hu D D, Zhang J W, Liu P, Zhao B, Dong S T. Effects of mixed-cropping with different varieties on photosynthetic characteristics and yield of summer maize under close planting condition [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, 44(6): 920-930 (in Chinese)

[24] 丁相鹏, 白晶, 张春雨, 张吉旺, 刘鹏, 任佰朝, 赵斌. 扩行缩株对夏玉米群体冠层结构及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(19): 3915-3927
Ding X P, Bai J, Zhang C Y, Zhang J W, Liu P, Ren B Z, Zhao B. Effects of line-spacing expansion and row-spacing shrinkage on population structure and yield of summer maize[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(19): 3915-3927 (in Chinese)

[25] 薛晓萍, 李楠, 张继波, 熊宇. 寡照对温室黄瓜花果期生长及产量品质影响研究[J]. 海洋气象学报, 2020, 40(3): 77-83
Xue X P, Li N, Zhang J B, Xiong Y. Effects of sparse sunlight on the growth in the flowering and fruit set stage and the fruit quality of cucumber in solar greenhouse[J]. *Journal of Marine Meteorology*, 2020, 40(3): 77-83 (in Chinese)

[26] 谭蓉, 贾桃, 陈晓丽, 郭文忠. 生殖生长期弱光对番茄表型特征和果实品质的影响[J]. 中国农业气象, 2022, 43(11): 902-911
Tan R, Jia T, Chen X L, Guo W Z. Low light during reproductive period of tomato affects the phenotypic characteristics and quality of fruit[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2022, 43(11): 902-911 (in Chinese)

责任编辑: 刘迎春

第一作者简介: 王春玲,博士研究生。主要从事设施光环境调控及宜机化生产研究。在 *Plants*, *Agriculture*, *Horticulture Environment and Biotechnology*,《农业工程学报》《塔里木大学学报》等期刊发表学术论文9篇,授权国家实用新型专利3项。

通讯作者简介: 杨冬艳,研究员。主要从事设施蔬菜栽培生理及废弃物资源化利用研究。近五年,主持国家及地区等基金项目12项;获得自治区科技成果登记6项,制定宁夏回族自治区地方标准5项(排名第1),发明专利1项,授权实用新型专利3项;以第一作者(含通讯作者)发表学术论文20余篇。获得自治区科技进步奖1项(排名第4),入选2021年自治区领军人才培养工程,是宁夏农林科学院蔬菜育种与栽培二级学科带头人。