

网络出版时间:2022-09-06 11:59

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2023.03.012

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20220905.1806.009.html

基质栽培下行距和灌水量对塑料大棚番茄光能和水 水分利用的影响

常佳悦,马小龙,吴故燃,李广毅,李建明

(西北农林科技大学 园艺学院,陕西 杨凌 712100)

【摘 要】【目的】探究行距和灌水量以及二者的交互作用对塑料大棚番茄光能和水利用特性的影响,为基质栽培行距和灌水量设置提供一定的依据。【方法】试验于塑料大棚内进行,以基质栽培的番茄品种‘金鹏 14-8’为供试材料。采用裂区设计,主区为种植行距,宽窄行栽培,窄行距为 40 cm,株距 35 cm,大行距设置 L_1 (70 cm, 5.19 株/ m^2)、 L_2 (120 cm, 3.57 株/ m^2) 和 L_3 (170 cm, 2.72 株/ m^2) 3 个水平;副区依据植株日蒸腾量(ET)设置 2 个灌水量水平:常规灌溉(N)为营养生长期灌水 1.25 ET、生殖生长期灌水 1.50 ET,轻度亏缺灌溉(K)为营养生长期灌水 1.00 ET、生殖生长期灌水 1.20 ET;两两组合成 L_1N 、 L_1K 、 L_2N 、 L_2K 、 L_3N 和 L_3K 共 6 个处理。通过测算番茄植株形态指标、干鲜质量、光能和水利用效率、产量等以及各指标间的相关性,综合分析番茄光能和水利用对种植行距和灌水量的响应。【结果】番茄株高、叶面积指数、单位面积产量、冠层辐射截获量(IPAR)均随着种植行距增大呈降低趋势, L_1N 单位面积产量最高,较其他处理增高 5.65%~55.65%;茎粗、叶面积、单株干鲜质量、单株产量、单株日蒸腾量随着种植行距增大呈升高趋势, L_3N 单株产量最高,较其他处理提高 3.10%~46.91%。 L_2N 冠层辐射利用率(RUE)最高,果实膨大期达 135.31 (g·s)/mmol,较其他处理提高 5.41%~67.59%,果实成熟期达 151.97 (g·s)/mmol,较其他处理提高 1.25%~48.86%; L_2K 灌溉水利用效率(IWUE)最高,为 39.18 g/kg,较其他处理增加 9.58%~33.90%。番茄植株单位面积下叶面积、干鲜质量、产量、IPAR 及 RUE 两两之间呈极显著正相关,蒸腾量与上述指标呈极显著负相关,IWUE 则与各指标间相关性不显著。【结论】适度增大种植行距对番茄单株增益明显,可以增强群体光能和水利用效率,单株产量大幅提高,单位面积产量略微降低;但过大的种植行距会造成无效损耗,导致单位面积产量、RUE 及 IWUE 均降低。常规灌溉番茄植株生长形态和物质积累优于轻度亏缺灌溉,但轻度亏缺灌溉可以显著提高 IWUE;种植行距与灌水量间存在交互作用,总体而言, L_2N 处理光能利用表现最好, L_2K 处理水分利用表现最佳。

【关键词】 番茄栽培;种植行距;灌水量;光能利用效率(RUE);灌溉水利用效率(IWUE)

【中图分类号】 S641.205

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2023)03-0111-10

Effects of row spacing and irrigation amount on light energy and water utilization of tomato in plastic greenhouse under substrate cultivation

CHANG Jiayue, MA Xiaolong, WU Guran, LI Guangyi, LI Jianming

(College of Horticulture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】 The effects of row spacing, irrigation amount and their interaction on light energy and water use characteristics of plastic greenhouse tomato were investigated to provide basis for management of row spacing and irrigation amount in substrate cultivation. 【Method】 The experiment was car-

【收稿日期】 2022-01-16

【基金项目】 陕西省科学技术厅区域创新能力引导计划项目(2021QFY08-04)

【作者简介】 常佳悦(1998—),女,河南林县人,在读硕士,主要从事设施番茄光能利用研究。E-mail:jiayue@nwafu.edu.cn

【通信作者】 李建明(1966—),男,陕西洛川人,教授,博士,博士生导师,主要从事设施农业工程与蔬菜生理生态研究。

E-mail:lijianming66@163.com

ried out in a plastic greenhouse and tomato variety ‘Jinpeng 14-8’ was cultivated in substrate. A split plot design was adopted with main plot of wide and narrow row spacing. The narrow row spacing was 40 cm, the plant spacing was 35 cm, and the large row spacing was set to L_1 (70 cm, 5.19 plants/ m^2), L_2 (120 cm, 3.57 plants/ m^2) and L_3 (170 cm, 2.72 plants/ m^2), respectively. The sub-area had 2 irrigation levels according to daily transpiration (ET) of plants. The conventional irrigation (N) was 1.25 ET in the vegetative growth period and 1.50 ET in the reproductive growth period, and the mild deficit irrigation (K) was 1.00 ET in the vegetative growth period and 1.20 ET in the reproductive growth period. A total of 6 treatments of L_1N , L_1K , L_2N , L_2K , L_3N and L_3K were synthesized in two groups. Tomato plant morphological indicators, dry and fresh weight, light energy and water use efficiency and yield were measured and correlations between indexes were analyzed to comprehensively analyze responses of tomato light energy and water use to planting row spacing and irrigation amount. 【Result】 Tomato plant height, leaf area index, yield per unit area, and canopy radiation interception per unit area (IPAR) decreased with the increase of planting row spacing. The yield per unit area of L_1N was the highest and 5.65%—55.65% higher than other treatments. Stem diameter, leaf area, dry and fresh weight per plant, yield per plant, and daily transpiration per plant increased with the increase of planting row spacing. The yield per plant of L_3N was the highest and 3.10%—46.91% higher than other treatments. L_2N had the highest canopy radiation utilization rate (RUE) of 135.31 (g·s)/mmol in fruit expansion stage, which was 5.41%—67.59% higher than other treatments, and 151.97 (g·s)/mmol in fruit ripening stage, which was 1.25%—48.86% higher than other treatments. L_2K had the highest irrigation water use efficiency (IWUE) of 39.18 g/kg, with an 9.58%—33.90% increase compared with other treatments. There were very significant positive correlations between leaf area, dry and fresh weight, yield, IPAR and RUE per unit area of tomato plants. Transpiration had extremely significant negative correlations with above indicators, while IWUE had no significant correlation with them. 【Conclusion】 Moderately increasing planting row spacing benefited tomato plant by enhancing group light energy and water use efficiency, greatly increasing yield per plant, and slightly reducing the yield per unit area. Excessive planting row spacing caused ineffective loss, resulting in decreases of unit area yield, RUE and IWUE. Growth morphology and biomass accumulation of conventional irrigation tomato plants were better than those of mild deficit irrigation, but mild deficit irrigation significantly improved IWUE. There were interactions between planting row spacing and irrigation amount. In general, L_2N treatment had the best performance in light energy utilization and L_2K treatment had the best performance in water utilization.

Key words: tomato cultivation; planting row spacing; irrigation amount; light energy use efficiency (RUE); irrigation water use efficiency (IWUE)

农业是我国的立国之本,面对随人口增长而不断增加的粮食需求以及农业生产劳动力不足等问题^[1],发展农业机械化是大势所趋。作为农业生产规模化、产业化、现代化的重要一环^[2],农业机械化可以降低人工劳动强度、显著提高农业生产效率、减少生产成本、创造良好的经济效益、改善农业工作环境,为新时期的农业发展注入新的活力^[3]。随着科技的进步,新型农机设备不断涌现,为农业机械化发展提供了坚实的保障,但与之配套的农艺措施还未得到很好的完善,农机与农艺融合困难、机械化配套性差成为制约作物机械化生产的重要原因^[4]。行距

是保证机械田间正常作业最重要的因素^[5],大行距种植模式便于机械化操作,是实现农业机械化发展的关键要素,顺应未来农业发展的趋势。近年来,由于人口快速增长、工农业发展、城镇化进程加快、水资源污染、全球变暖等多方面原因,水资源危机凸显^[6-7]。在我国,农业灌溉用水量占全国用水量的80%,是用水的大户,但却存在水分利用效率不高、水资源浪费严重的问题^[8]。鉴于此,发展节水灌溉、在保证作物优质高产的基础上提高灌溉水利用效率成为当务之急。

有关种植密度或灌水量对作物生长发育的影

响,前人已有很多研究,随着种植密度增大,植株节间长度增加、株高增大,但茎粗减小,植株高而细弱^[9];由于单位面积株数增多,叶面积指数可能增加,但单株叶面积降低,同时由于叶片间的遮挡效应,叶片光合速率、蒸腾速率以及气孔导度均随着种植密度的增大而显著降低,最终导致干物质积累减少、单株产量降低^[10-11]。高种植密度会造成群体冠层结构和冠层内光分布不合理,尤其中、下部通风透光变差,叶片功能期缩短,光合生产能力降低;而中、低密度下中、下部叶片光照条件良好,群体光合能力更高,总产量也更高,且随着生育期的推进,中、低密度的优势愈加明显^[12-13],因此适度降低种植密度可以有效挖掘群体生产潜力。但种植行距增加,也会导致植株蒸腾量增大,无效耗水增多,造成植株水分利用效率降低^[14],在有限的灌水量下,增大种植密度可以提高水分利用效率^[15]。因此,通过设置适宜种植密度达到光能利用效率和水分利用效率的平衡,才能更好地发挥群体效应,提高产量。此外,灌水量增加则灌溉水利用效率降低^[16-17],而适度亏缺灌溉可以提高作物水分利用效率及灌溉水利用效率^[18-19]。

有关种植密度或灌水量对作物生长形态、产量及水分利用效率等的影响,前人已有许多研究,但对于二者之间交互作用的探讨仍较少,且前人对种植密度的研究多在常规行距下进行,不利于机械化操作,本试验增设了大行距处理,以期在实现机械化作业的同时构建较好的植株冠层结构、优化作物空间布局,得到综合效果最佳的栽培模式。连作障碍是阻碍设施蔬菜产业健康发展的一个主要原因,基质栽培作为一种新兴栽培方式可以有效改善设施连作障碍,近年来得到广泛关注和应。本试验通过测定基质栽培下不同行距和灌水量处理的番茄生长形态、各器官干鲜质量、冠层光截获、单株蒸腾量、产量等一系列指标,探究行距和灌水量对基质栽培番茄光能和水利用的影响,并分析了种植行距和灌水量的交互效应,旨在为基质栽培番茄行距和灌水量的设置提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试番茄品种为‘金鹏 14-8’,为陕西关中地区主栽品种,具有抗病毒病的特点。

供试基质为无营养添加的育苗基质,成分包含椰糠、泥炭、炭化稻谷壳和微生物菌种,容重为0.2~0.4 g/cm³,总孔隙度≥60%,通气孔隙度≥15%,气

水比 1:3,pH 为 5~7,有机质≥50%,由广州生升农业有限公司配制。

1.2 试验设计

试验于 2021 年 3—7 月在陕西杨凌千玉试验基地塑料大棚内(E108°3',N34°15',平均海拔 500 m)进行,试验期间棚内平均气温 10.97~32.17℃,平均相对湿度 63.50%~97.38%,有效积温 1 379.58℃(番茄生长发育下限温度取 10℃),平均光合有效辐射 25.05~377.38 μmol/(m²·s)。番茄幼苗三叶一心时定植,基于当地气候环境和栽培条件,留 5 穗果打顶。采用盆栽的方法,栽培盆高 20 cm,直径 32 cm,栽培基质按照育苗基质、腐熟牛粪体积比 3:1 配制而成。盆内用黑色地膜覆盖,防止土壤水分蒸发,每盆底部放置托盘承装下渗的土壤重力水。

试验采用裂区设计,主区为种植行距,宽窄行栽培(图 1),小行距固定为 40 cm,株距 35 cm,大行距作为试验变量之一,分别为 70 cm(L₁,5.19 株/m²)、120 cm(L₂,3.57 株/m²)和 170 cm(L₃,2.72 株/m²);副区为灌水量,包括正常灌溉(N)和轻度亏缺灌溉(K)2 个水平,具体为以第一穗花坐果作为临界点,将番茄生育期划分为营养生长期和生殖生长期 2 个阶段,营养生长期 N 和 K 水平灌水量分别为 1.25 ET 和 1.00 ET,生殖生长期灌水量分别为 1.50 ET 和 1.20 ET。其中 ET 值指单株日蒸腾量,其确定方法为:各种种植行距处理设置非试验小区,全生育期灌水量等于蒸腾量,各小区选择 6 株进行标记,每天早上 07:00 用电子秤(精度 0.1 g)称盆栽质量,计算与前一日质量的差值即为 ET 值。根据试验方案计算出各处理灌水量及灌溉时间(单个滴箭流速取 8.3 g/min),定时定量灌溉。安装水表(精度 0.001 m³)记录实际灌水量(表 1),用于数据核验。主副区采用随机区组排列,共 6 个处理:L₁N、L₁K、L₂N、L₂K、L₃N 和 L₃K,每个小区种植 160 株(8 行×20 株/行)。

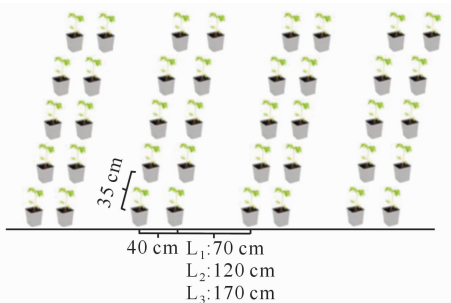


图 1 不同行距番茄盆栽田间排列

Fig. 1 Field arrangement of tomato potted plants with different row spacings

表 1 不同种植行距和灌水量处理下番茄全生育期累积灌水量

Table 1 Cumulative irrigation amount of tomato in the whole growth period under treatments with different planting row spacings and irrigation amounts L/株

处理 Treatment	第一穗花开 First spike blooms	第一穗花坐果 First flower spike set fruit	第一穗果 膨大结束 End of first ear fruit enlargement	第一穗果成熟 First ear fruit mature	第二穗果成熟 Second ear fruit mature	第三穗果成熟 Third ear fruit mature	第四穗果成熟 Fourth ear fruit mature	全生育期 Full growth period
L ₁ N	4.70	14.40	30.54	48.70	56.02	67.34	73.83	83.49
L ₁ K	3.76	11.52	24.43	38.96	44.82	53.87	59.06	66.80
L ₂ N	4.76	14.75	33.49	51.10	59.51	72.45	80.44	92.15
L ₂ K	3.81	11.80	26.79	40.88	47.61	57.96	64.35	73.72
L ₃ N	4.86	15.38	35.66	55.51	65.94	81.83	92.60	108.07
L ₃ K	3.89	12.31	28.53	44.41	52.75	65.47	74.08	86.46

1.3 项目测定与计算

1.3.1 形态指标 每个处理选择 4 株番茄,在果实膨大期和果实成熟期(分别以第一穗果膨大和第四穗果成熟为标志)分别测量番茄植株株高、茎粗、叶面积,并计算叶面积指数。其中,株高为子叶到生长点的距离,用卷尺(精度 0.1 cm)测量;茎粗为植株第一穗花上一个节位横径与纵径(十字交叉法)的平均值,用游标卡尺(精度 0.01 cm)测量;叶面积通过 Image J 图像处理法^[20]测定,即将叶片剪下放到带刻度线的白纸板上,用相机拍照,所得照片再通过 Image J 软件进行分析,从而得到实际叶面积,并通过下式计算叶面积指数。

叶面积指数=总叶面积/土地面积。

1.3.2 各器官干鲜质量及其分配比例 在果实膨大期和果实成熟期,每个处理选择 4 株番茄分别用电子秤(精度 1 g)称量根、茎、叶、果实的鲜质量,再放入烘箱中 105 ℃杀青 30 min,80 ℃下烘干至质量恒定,用电子天平(精度 0.01 g)称量各器官干质量,通过公式计算得到不同生育期各器官鲜(干)质量分配比例。

鲜(干)质量分配比例=鲜(干)质量/全株鲜(干)质量×100%。

1.3.3 光能利用特性 根据试验地中心区域冠层顶部和各处理中心区域窄行距底部光照度记录仪 MX2202 测得光合有效辐射(以 d 为步长),通过以下公式计算冠层辐射截获量(IPAR)、冠层辐射截获率(FIPAR)以及冠层辐射利用率(RUE)。

IPAR=PAR_t-PAR_b;
FIPAR=IPAR/PAR_t×100%;
RUE=B/IPAR。

式中:PAR_t为冠层顶部光合有效辐射,PAR_b为冠层底部光合有效辐射,B为单位面积地上部(叶、茎、

果实)干物质量。

1.3.4 水分利用特性 (1)单株蒸腾量日变化。第四穗果成熟时测定,每个处理选择 4 株番茄进行标记,选一典型晴天在 08:00—20:00 每小时称盆栽质量 1 次,与上一次的差值为当前时段蒸腾量。

(2)灌溉水利用效率。番茄灌溉水利用效率(IWUE)指单位灌水量下番茄的果实产量,计算公式如下:

IWUE=果实产量/总灌水量。

1.3.5 单株产量和单位面积产量 每个处理选择 10 株番茄进行标记,果实成熟即采收,并称取质量,计算得到单株产量,根据种植密度折算得到单位面积产量。

1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2016 和 SPSS 25.0 进行数据处理与分析,通过双因素方差分析法分析两个因素的主效应以及二者的交互作用(P<0.05);利用多重比较法(Duncan)对各处理间差异显著性进行比较(P<0.05);通过 Pearson 相关系数分析指标两两之间的相关性;采用 OriginPro 2021 进行图形绘制。

2 结果与分析

2.1 种植行距和灌水量耦合对番茄不同生育期形态指标的影响

表 2 显示,番茄果实膨大期叶面积指数随种植行距减小而显著增加;相同种植行距下常规灌溉植株株高、茎粗、叶面积、叶面积指数均大于轻度亏缺灌溉,但除株高外,其余指标差异不显著。果实成熟期种植行距和灌水量均显著影响植株形态,种植行距增大,植株茎粗和叶面积显著增加,而叶面积指数则随着行距增大而显著减小;果实成熟期灌水量对

植株形态的影响与果实膨大期大体一致,但不同灌水量处理间差异较果实膨大期增大,常规灌溉下植株株高、茎粗、叶面积分别较亏缺灌溉增加了5.09%~12.30%,2.77%~9.27%和 8.64%~10.89%。另据统计分析,种植行距与灌水量的交互作用显著影响株高,而对茎粗、叶面积和叶面积指数无显著影响。

表 2 种植行距和灌水量对番茄不同生育期形态指标的影响

Table 2 Effects of planting row spacing and irrigation amount on morphological indexes of tomato at different growth stages

处理 Treatment	果实膨大期 Fruit expansion period			
	株高/cm Plant height	茎粗/mm Stem diameter	叶面积/cm² Leaf area	叶面积指数 Leaf area index
L ₁ N	136.00±1.63 a	12.40±0.45 bc	4 969.00±111.54 ab	2.58±0.06 a
L ₁ K	117.17±1.18 c	12.07±0.18 c	4 769.39±134.66 b	2.48±0.07 a
L ₂ N	137.50±2.48 a	13.35±0.87 abc	5 288.52±256.12 a	1.89±0.09 b
L ₂ K	127.00±0.82 b	13.54±0.86 ab	5 017.86±170.06 ab	1.79±0.06 b
L ₃ N	135.17±3.01 a	14.03±0.41 a	5 378.14±232.64 a	1.46±0.06 c
L ₃ K	129.83±2.39 b	13.74±0.63 ab	5 076.67±112.26 ab	1.38±0.03 c

处理 Treatment	果实成熟期 Fruit ripening period			
	株高/cm Plant height	茎粗/mm Stem diameter	叶面积/cm² Leaf area	叶面积指数 Leaf area index
L ₁ N	143.00±2.45 a	13.41±0.29 c	5 156.49±261.00 d	2.68±0.14 a
L ₁ K	127.33±1.89 c	12.27±0.33 d	4 718.38±134.19 e	2.45±0.07 b
L ₂ N	140.67±0.47 ab	15.06±0.33 b	6 574.80±151.19 ab	2.35±0.05 b
L ₂ K	131.00±2.16 c	14.66±0.51 b	5 929.12±171.56 c	2.12±0.06 c
L ₃ N	137.67±0.94 b	16.21±0.41 a	6 952.09±178.36 a	1.89±0.05 d
L ₃ K	131.00±2.83 c	14.84±0.38 b	6 399.32±259.13 b	1.74±0.07 d

注:表中数据为“平均值±标准差”;同列数据后标不同小写字母表示差异显著($P<0.05$);下同。
Note:The data are “mean±standard deviation”. Different lowercase letters indicate significant difference ($P<0.05$). The same below.

2.2 种植行距和灌水量耦合对番茄不同生育期干鲜质量及其在各器官分配比例的影响

表 3 表明,不同生育期各种植行距下全株鲜质量和干质量受灌水量的影响表现不同,果实膨大期全株鲜质量在 L₁ 下表现为常规灌溉显著高于轻度亏缺灌溉,而在 L₂ 和 L₃ 下则相反;全株干质量在各种种植行距下均表现为常规灌溉优于轻度亏缺灌溉,且在 L₂ 下干质量显著高于 L₁ 和 L₃。在番茄果实成熟期,相同行距下全株鲜质量均表现为常规灌溉

高于轻度亏缺灌溉,且在 L₂ 和 L₃ 处理下二者达到显著差异水平;全株干质量在 L₁ 下表现为轻度亏缺灌溉略高于常规灌溉,而在 L₂ 和 L₃ 下则表现为常规灌溉显著高于轻度亏缺灌溉。相同灌水量下,番茄果实成熟期全株干鲜质量在行距 L₂ 与 L₃ 间差异不显著,且均显著高于 L₁。种植行距和灌水量对全株干鲜质量的影响均在果实成熟期达到显著水平,且二者之间存在显著交互作用。

表 3 种植行距和灌水量对番茄不同生育期干鲜质量的影响

Table 3 Effects of planting row spacing and irrigation amount on dry and fresh weight of tomato at

different growth stages g

处理 Treatment	果实膨大期 Fruit expansion period		果实成熟期 Fruit ripening period	
	全株鲜质量	全株干质量	全株鲜质量	全株干质量
	Fresh weight of whole plant	Dry weight of whole plant	Fresh weight of whole plant	Dry weight of whole plant
L ₁ N	1 241±21 bc	181.45±7.47 d	2 959.00±42.61 c	329.17±6.21 c
L ₁ K	935±23 d	165.73±2.20 d	2 882.27±24.41 c	352.15±9.76 c
L ₂ N	1 239±38 bc	252.46±6.86 a	3 955.87±69.25 a	538.85±23.67 a
L ₂ K	1 326±51 a	222.54±10.73 b	3 580.33±37.47 b	428.99±4.12 b
L ₃ N	1 225±11 c	201.79±4.93 c	4 046.33±74.15 a	476.72±13.95 a
L ₃ K	1 311±47 ab	197.68±8.12 c	3 655.33±13.66 b	419.29±0.77 b

番茄干鲜质量在各器官中的分配比例可以说明植株体内物质的利用情况,果实干鲜质量占比越高则表明物质利用越充分。由表 4 可以看出,果实膨大期和果实成熟期不同处理对植株干鲜质量在各器官中分配比例的影响不一致,成熟期果实鲜质量占全株鲜质量的比例随着种植行距增大而增加,相同

行距下常规灌溉果实鲜质量占比高于轻度亏缺灌溉;各种种植行距下果实干质量占全株干质量的比例同样表现为常规灌溉大于轻度亏缺灌溉,但不同灌溉水平下随着种植行距增大,果实干质量占比的变化趋势不同,在常规灌溉下以 L₂ 果实干质量占比最大,在轻度亏缺灌溉下则是 L₁ 果实干质量占比最

大。总体而言, L_3N 处理果实鲜质量占比最大, L_2N 占比大有利于增大后期果实干鲜质量占比, 二者之处理果实干质量占比最大。同时, 果实膨大期叶、茎之间存在一定的相关性。

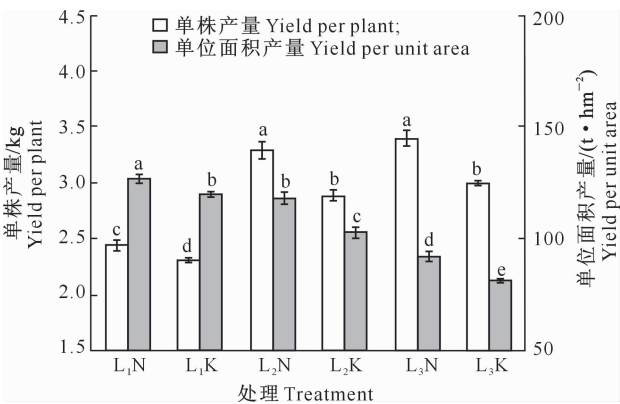
表 4 种植行距和灌水量对番茄不同生育期干鲜质量在各器官中分配比例的影响

Table 4 Effects of planting row spacing and irrigation amount on the distribution ratio of dry and fresh weight in different organs of tomato at different growth stages								
处理 Treatment	果实膨大期 Fruit expansion stage							
	鲜质量分配比例 Proportion of fresh weight in different organs				干质量分配比例 Proportion of dry weight in different organs			
	叶 Leaf	茎 Stem	果 Fruit	根 Root	叶 Leaf	茎 Stem	果 Fruit	根 Root
L_1N	25.16±1.02 a	12.55±0.91 a	59.19±1.88 ab	3.10±0.05 a	24.62±4.40 c	21.17±0.57 a	44.36±3.35 a	9.85±0.48 b
L_1K	24.44±2.35 a	11.89±0.55 ab	58.63±1.23 ab	5.04±1.67 a	30.94±0.27 b	18.05±1.29 bc	39.64±0.84 b	11.37±0.73 a
L_2N	26.39±3.95 a	12.52±1.61 a	57.21±7.10 ab	3.88±1.54 a	36.06±1.87 a	18.88±0.35 b	37.82±1.01 b	7.23±0.51 c
L_2K	27.42±1.11 a	12.82±0.06 a	54.87±0.16 b	4.89±1.32 a	32.56±0.60 ab	20.71±0.95 a	37.62±0.81 b	9.11±0.47 b
L_3N	27.83±2.62 a	13.68±0.62 a	55.55±2.53 ab	2.93±0.71 a	32.59±1.42 ab	21.28±0.61 a	38.33±2.32 b	7.81±0.28 c
L_3K	22.45±0.60 a	10.18±0.29 b	63.09±1.76 a	4.28±0.88 a	28.52±0.31 bc	16.41±0.87 c	45.09±1.44 a	9.98±0.26 b

果实成熟期 Fruit ripening period								
处理 Treatment	鲜质量分配比例 Proportion of fresh weight in different organs				干质量分配比例 Proportion of dry weight in different organs			
	叶 Leaf	茎 Stem	果 Fruit	根 Root	叶 Leaf	茎 Stem	果 Fruit	根 Root
L_1N	9.80±0.22 bc	5.34±0.17 bc	82.56±0.47 ab	2.30±0.18 c	10.62±0.66 bc	5.73±0.34 d	81.07±0.49 a	2.58±0.10 bc
L_1K	10.82±0.16 a	5.76±0.19 a	80.23±0.20 d	3.19±0.14 a	11.66±0.83 ab	6.82±0.22 bc	78.73±1.15 b	2.79±0.22 bc
L_2N	9.74±0.47 bc	4.70±0.05 d	83.28±0.61 a	2.28±0.11 c	9.57±0.85 c	5.25±0.38 d	82.69±1.41 a	2.48±0.24 c
L_2K	10.81±0.33 a	5.73±0.22 ab	80.67±0.60 c	2.79±0.11 b	11.92±0.53 ab	7.10±0.12 ab	77.42±0.66 b	3.56±0.08 a
L_3N	9.39±0.22 c	5.12±0.24 c	83.96±0.20 a	1.53±0.09 d	10.79±0.68 bc	6.38±0.33 c	80.96±0.80 a	1.86±0.05 d
L_3K	10.31±0.26 ab	5.31±0.16 c	81.97±0.28 b	2.41±0.04 c	12.42±0.29 a	7.66±0.09 a	77.02±0.34 b	2.90±0.03 b

2.3 种植行距和灌水量耦合对番茄产量的影响

不同处理下番茄单株产量和单位面积产量表现出不同的变化趋势(图 2)。



同类型柱上标不同小写字母表示处理间差异显著
Different lowercase letters indicate significant difference between treatments

图 2 种植行距和灌水量对番茄单株产量和单位面积产量的影响

Fig. 2 Effects of planting row spacing and irrigation amount on tomato yield per plant and per unit area

图 2 显示, 相同灌水量下, 随种植行距增大, 单株产量增加, 表现为 L_2 与 L_3 间差异不显著, 但均显著高于 L_1 ; 随种植行距增大, 单位面积株数减少, 因此单位面积产量显著降低。就灌水量而言, 相同种植行距下单株产量和单位面积产量均表现为常规灌

溉>轻度亏缺灌溉, 且差异显著。种植行距与灌水量的交互作用对单株产量和单位面积产量的影响均达到显著水平, 种植行距越大, 不同灌水量水平间差异越大。总体而言, 种植行距由 L_1 增大到 L_2 , 单株产量大幅提高, 但单位面积产量减少幅度较小; 从 L_2 增大到 L_3 , 单株产量增幅不大, 但单位面积产量显著降低; L_2N 处理的单株产量和单位面积产量综合表现较好, 分别达到 3.29 kg 和 117.67 t/hm²。

2.4 种植行距和灌水量耦合对番茄光能利用特性的影响

由表 5 可知, 番茄果实膨大期 IPAR 主要受种植行距影响, 种植行距越大, IPAR 越小, FIPAR 越低, 而相同行距不同灌水量水平间 IPAR 和 FIPAR 差异不明显。果实成熟期种植行距和灌水量均对 IPAR 和 FIPAR 产生明显影响, 种植行距小、灌水量多, 则 IPAR 和 FIPAR 高。不同生育期番茄 RUE 变化趋势相似, 果实膨大期种植行距与灌水量之间无显著交互作用, 相同种植行距均表现为常规灌溉 RUE 高于轻度亏缺灌溉, 但 L_3 处理下二者差异不显著; 相同灌溉条件下, L_1 与 L_2 处理间 RUE 差异不显著, 但二者均显著高于 L_3 。果实成熟期种植行距与灌水量的交互作用对 RUE 产生显著影响, L_1 处理下轻度亏缺灌溉 RUE 显著高于常规灌溉, 而 L_2 和 L_3 处理则是常规灌溉的 RUE 更高; 常

规灌溉条件下,不同种植行距的 RUE 表现为 $L_2 > L_1 > L_3$,而轻度亏缺灌溉条件下则表现为 $L_1 > L_2 > L_3$,且两两之间差异显著。总体而言,番茄果实成熟期 L_2N 处理的 RUE 最高,达 $151.97 (g \cdot s) / mmol$,其次是 L_1K 处理,两者间差异不显著,过大的种植行距(L_3)会导致 RUE 大幅下降。

表 5 种植行距和灌水量对番茄不同生育期累积 IPAR、FIPAR 和 RUE 的影响

Table 5 Effects of planting row spacing and irrigation amount on cumulative IPAR,average FIPAR and RUE of tomato at different growth stages

处理 Treatment	果实膨大期 Fruit expansion period			果实成熟期 Fruit ripening period		
	IPAR/ ($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	FIPAR/%	RUE/ ($g \cdot s \cdot mmol^{-1}$)	IPAR/ ($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	FIPAR/%	RUE/ ($g \cdot s \cdot mmol^{-1}$)
L ₁ N	6 621±50 a	53.95±0.21 a	128.37±5.97 a	12 130±95 a	65.97±0.57 a	137.33±2.67 b
L ₁ K	6 556±71 a	53.42±0.54 a	116.40±2.50 b	11 849±171 a	64.44±0.51 a	150.09±4.26 a
L ₂ N	6 183±44 b	50.38±0.60 bc	135.31±4.42 a	11 314±126 b	61.53±0.62 b	151.97±7.64 a
L ₂ K	6 201±81 b	50.53±1.34 b	116.47±5.02 b	11 104±179 bc	60.39±0.81 bc	133.06±1.28 b
L ₃ N	5 975±71 c	48.69±0.53 c	84.71±1.81 c	10 914±114 c	59.36±0.71 c	116.64±3.38 c
L ₃ K	5 997±46 c	48.86±0.83 bc	80.74±3.08 c	10 852±125 c	59.02±1.02 c	102.09±0.16 d

2.5 种植行距和灌水量耦合对番茄水分利用特性的影响

植株蒸腾消耗主要集中在每天 12:00—14:00,其余时间段的蒸腾消耗依次减少(图 3)。种植行距增大和灌水量增加均造成各时间段的蒸腾量增加,

从而导致日蒸腾量显著增加,种植行距和灌水量在单株日蒸腾量上不存在显著交互作用。总体而言,各处理单株日蒸腾量表现为: $L_3N(1\,511.93\,g) > L_3K(1\,264.40\,g) > L_2N(1\,123.47\,g) > L_2K(1\,015.53\,g) > L_1N(912.33\,g) > L_1K(725.57\,g)$ 。

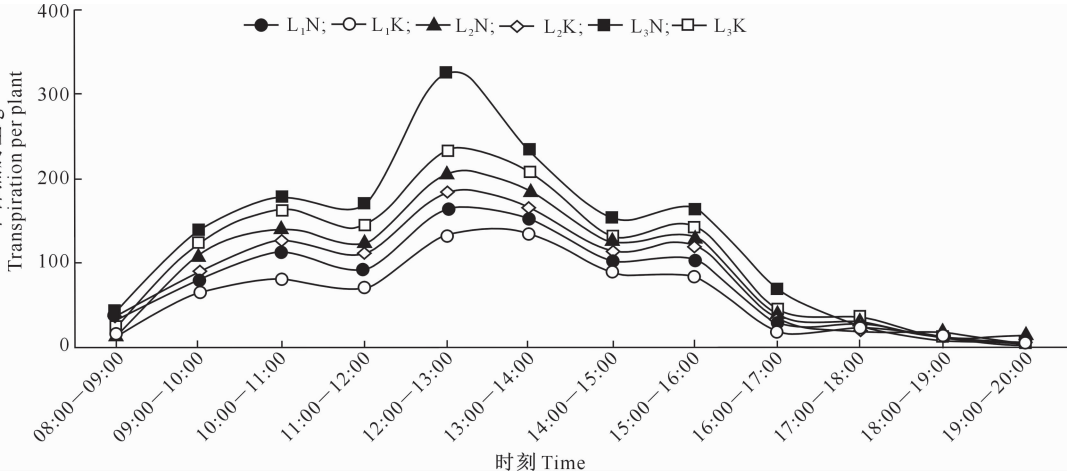


图 3 种植行距和灌水量对番茄蒸腾量日变化的影响

Fig. 3 Effects of planting row spacing and irrigation amount on diurnal variation of tomato transpiration

图 4 显示,轻度亏缺灌溉有利于番茄 IWUE 提高,且作用显著;相同灌水量条件下 IWUE 随着种植行距增大呈现先增高后降低的变化趋势,种植行距与灌水量之间存在显著交互作用。总之, L_2K 处理 IWUE 最高,达到 $39.18\,g/kg$ 。

2.6 番茄光能和水分利用及物质积累的相关性

通过 Pearson 相关系数对番茄单位面积下的叶面积指数、干鲜质量、产量以及 IPAR、RUE、蒸腾量、IWUE 两两之间的相关性进行分析,结果(表 6)显示,不同处理番茄植株叶面积指数、干鲜质量、产量、IPAR、RUE 两两之间呈极显著正相关,上述指标与蒸腾量呈极显著负相关,IWUE 则与各指标之间的相关性均不显著。

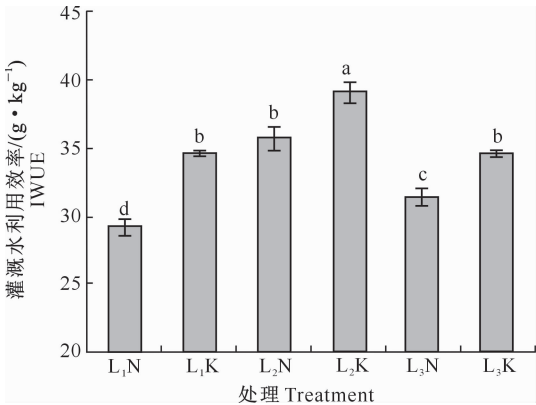


图 4 种植行距和灌水量对番茄 IWUE 的影响

Fig. 4 Effects of planting row spacing and irrigation amount on tomato IWUE

表 6 番茄光能和水分利用及物质积累的相关性

Table 6 Correlation between light energy and water use and substance accumulation in tomato

指标 Index	叶面积指数 Leaf area index	鲜质量 Fresh weight	干质量 Dry weight	产量 Yield	IPAR	RUE	蒸腾量 Transpiration
鲜质量 Fresh weight	0.953**	1					
干质量 Dry weight	0.892**	0.953**	1				
产量 Yield	0.957**	0.994**	0.942**	1			
IPAR	0.924**	0.911**	0.787**	0.900**	1		
RUE	0.808**	0.884**	0.980**	0.878**	0.652**	1	
蒸腾量 Transpiration	-0.727**	-0.794**	-0.751**	-0.732**	-0.783**	-0.654**	1
IWUE	-0.277	-0.141	0.027	-0.194	-0.432	0.145	-0.142

注: ** 表示在 $P<0.01$ 水平极显著相关。
Note: ** indicates very significant correlation at the $P<0.01$ level.

3 讨 论

作物群体密度、株行距配置等栽培方式的调整是改善作物群体光照、调节微气候的重要措施,合理的株行距不仅能实现作物群体光能捕获与利用效率的最大化,增加作物生物量与产量的积累,同时也可以提高水分、肥料等资源的利用效率。轻度亏缺灌溉被证实几乎不影响作物生长与产量,已经成为众多作物节水灌溉的重要途径,但亏缺灌溉对于作物生长与产量形成的影响受到作物群体密度介导的冠层微环境的显著影响。前人的研究多集中于单因素的影响,关于两者间交互作用的研究较少。本研究基于设施生产机械化迅速发展的背景,分析了宽窄行栽培下番茄不同行距以及灌水量耦合对植株形态结构、光能利用与水分利用特性的影响。

提高番茄生产的能源利用效率可以有效降低生产成本并改善植株生长状况,是生产中重点关注的问题,其中主要是光能利用效率和水分利用效率。种植行距一方面直接改变番茄群体结构,导致冠层内微气候差异^[21],特别是改变冠层内光的分布;另一方面,长期的微气候差异也会造成单株形态结构和生理功能的改变^[22],不同种植行距群体光分布和植株光合生理特性的不同,最终表现在植株光能利用存在差异,同时,光环境差异也会影响番茄蒸腾量,从而影响植株水分利用效率。灌水量则会直接影响植株内部生理反应^[23],从而造成光能利用效率和水分利用效率上的差异,同时也会通过影响单株形态间接改变作物群体结构。合适的种植行距和灌水量能够平衡植株光能与水分利用,从而提高番茄光能和水分利用效率。

作物群体对光能的吸收与转换效率直接决定着作物生物量与产量的形成。大多数 C3 植物田间实际光能利用效率仅为 2.81% 左右,距离理论最大值

4.6% 仍然有很大的提升空间^[24]。在栽培中,作物群体的光能利用特性主要取决于作物的生理状况与冠层微气候,不同的群体密度或植株排列方式显著影响作物群体光分布,进而在短期尺度上通过微环境的差异影响作物光合、蒸腾等过程,长期尺度上则是由于驯化作用而改变植株的结构与功能。本研究中,随着生育期的推进,不同种植行距和灌水量间作物生长差异增大,种植行距窄,番茄最终植株茎粗和叶面积小,但株高和叶面积指数大,植株细弱而密集,这与前人研究结果一致^[9]。灌水量不足会造成植株株高、茎粗、叶面积减小^[25-26]。本试验结果表明,不同种植行距下,常规灌溉植株株高、茎粗、叶面积均大于轻度亏缺灌溉。

植株生长所积累的化学能均来源于其吸收的光能,而 IPAR 主要受群体冠层结构影响,包括栽培密度和单株形态两个方面,种植行距小,单位土地面积叶片覆盖率高,IPAR 大,灌水量则通过影响单株形态改变 IPAR。本研究中,番茄生长前期不同灌溉水平间 IPAR 基本没有差异,生长后期出现差异,但差异不明显。RUE 为单位面积地上部干物质质量与 IPAR 的比值,受外在形态表现和内在物质积累两方面的影响。本试验结果显示,L₁ 与 L₂ 处理间的 RUE 差异相对较小,而 L₃ 相较 L₁ 和 L₂,RUE 显著降低。杨胜举等^[27]研究得出,高密度下玉米的 RUE 显著大于低密度,本试验研究结果与其相似。本研究中,L₁ 处理下单位面积番茄植株数量多,因此单位面积地上部干物质质量和 IPAR 大,最终计算得到的 RUE 也高;L₂ 相较 L₁,单位面积植株数减少,因而单位面积地上部干物质质量和 IPAR 均减小,但单株地上部干物质质量增加,最终计算得到的 RUE 增大;L₃ 相较 L₂,IPAR 减小较少,但单位面积植株数大幅减少,且单株地上部干物质质量增加很少,故单位面积地上部干物质质量显著减少,RUE 也显著降

低。在番茄生育后期,种植行距与灌水量间的交互作用显著影响 RUE,行距为 L_2 和 L_3 时,常规灌溉下番茄 RUE 高于轻度亏缺灌溉,但在 L_1 下反而是轻度亏缺灌溉 RUE 更高。光能利用影响物质积累,吴宣毅等^[28]通过番茄种植行距与灌水量的双因子试验研究发现,行距和灌水量最大的组合单株产量最高。本试验结果同样表明,增大种植行距,植株干鲜质量增加,单株产量也提高,但由于单位面积株数减少,因而单位面积产量呈下降趋势;种植行距和灌水量对番茄植株干鲜质量和产量存在显著交互作用,整体来看,常规灌溉下植株干鲜质量和产量高于轻度亏缺灌溉,但不同种植行距下常规灌溉与轻度亏缺灌溉间的差异表现不同,种植行距小,常规灌溉与轻度亏缺灌溉间的差异较小,甚至果实成熟期轻度亏缺灌溉全株干质量高于常规灌溉,随着种植行距增大,常规灌溉与轻度亏缺灌溉间的差距增大,常规灌溉全株干鲜质量及产量显著高于轻度亏缺灌溉。

常规灌溉下植株日蒸腾量高于轻度亏缺灌溉,种植行距增大,太阳辐射增加,植株日蒸腾量增大,这与前人研究结果一致^[14,29]。IWUE 是产量与灌水量的比值,适度亏缺灌溉可以在对产量影响较小的基础上大幅提高 IWUE^[30-31]。Zahid 等^[32]研究得出,不同行距下 75% 亏缺灌溉番茄单株产量均较 100% 正常灌溉小幅降低,但单位灌水量的产量明显增加,本试验研究结果与其一致,各种种植行距下轻度亏缺灌溉 IWUE 均显著高于常规灌溉。一定范围内增大种植行距可以大幅提高单株产量,从而提高 IWUE;但超过某一阈值后,再增大种植行距对产量的增加效应不明显,反而导致植株蒸腾量增加,无效耗水增多,IWUE 降低。本研究中种植行距和灌水量在 IWUE 上存在显著交互作用,行距 L_1 、 L_2 、 L_3 下,轻度亏缺灌溉 IWUE 较常规灌溉分别提高 18.28%、9.56% 和 10.24%,种植行距窄时,轻度亏缺灌溉对 IWUE 的增加效应更显著。

本试验仅从表型指标分析了植株光能和水利用的相互影响,但缺乏内在机理解释,后续工作将从植株体内光能和水利用途径入手,进一步分析种植行距和灌水量耦合对植株光能和水利用的交互效应。

4 结 论

种植行距和灌水量在对番茄株高、干鲜质量、产量、RUE、IWUE 的影响上均表现出显著的交互作

用,不同种植行距下,常规灌溉和轻度亏缺灌溉效应有所不同,种植行距越大,常规灌溉较轻度亏缺灌溉的优势越明显。总体而言, L_2 N 处理(120 cm,正常灌溉)RUE 最高,达 151.97 ($\text{g} \cdot \text{s})/\text{mmol}$; L_2 K 处理(120 cm,轻度亏缺灌溉)IWUE 最高,达 39.18 g/kg 。

[参考文献]

- [1] 陈立才,黄芳,李艳大,等.南方双季稻区小行距插秧机的改进设计与试验[J].农机化研究,2016,38(12):183-187.
Chen L C, Huang F, Li Y D, et al. Improved design and experiment of small-row rice transplanter in southern double-cropping rice area [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(12): 183-187.
- [2] 张伟朋.农业机械化发展问题与分析[J].辽宁农业科学,2020,312(2):67-69.
Zhang W P. Problems and analysis of agricultural mechanization development [J]. Liaoning Agricultural Sciences, 2020, 312(2): 67-69.
- [3] 吴寅,高桐梅,王东勇,等.机播模式下芝麻不同行株距配置的高产效应研究[J].华北农学报,2018,33(6):145-151.
Wu Y, Gao T M, Wang D Y, et al. Study on the high-yield effect of sesame seeds with different row spacing arrangements under machine-seeding mode [J]. North China Agricultural Journal, 2018, 33(6): 145-151.
- [4] 姚文燕,刁培松,张银平,等.两熟区小麦玉米种植模式对机械化作业的影响[J].农机化研究,2021,43(4):255-262.
Yao W Y, Diao P S, Zhang Y P, et al. The effect of wheat and corn planting patterns on mechanized operations in two cropping areas [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(4): 255-262.
- [5] 谭裕模,邢颖,蒙炎成,等.广西甘蔗全程机械化相适应种植行距及模式[J].西南农业学报,2018,31(3):471-477.
Tan Y M, Xing Y, Meng Y C, et al. Full-process mechanization of sugarcane in Guangxi adapts to planting row spacing and patterns [J]. Southwest Journal of Agricultural Sciences, 2018, 31(3): 471-477.
- [6] Howladar S M. Potassium humate improves physio-biochemical attributes, defense systems activities and water-use efficiencies of eggplant under partial root-zone drying [J]. Scientia Horticulturae, 2018, 240: 179-185.
- [7] 马世浩,杨丞,王贵兵,等.水稻节水灌溉技术模式研究进展[J].节水灌溉,2021(8):19-24.
Ma S H, Yang C, Wang G B, et al. Research progress of rice water-saving irrigation technology model [J]. Water-Saving Irrigation, 2021(8): 19-24.
- [8] 丁平.我国农业灌溉用水管理体制研究[D].武汉:华中农业大学,2006.
Ding P. Research on my country's agricultural irrigation water management system [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2006.

- [9] 金兵兵,姬祥卓,庄泽龙,等. 种植密度对不同玉米品种农艺性状及产量的影响[J]. 甘肃农业大学学报,2021,56(3):73-85.
Jin B B, Ji X Z, Zhuang Z L, et al. Effects of planting density on agronomic characteristics and yields of different maize varieties [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2021, 56(3): 73-85.
- [10] 王 岩,牟玉梅,张爱民,等. 不同种植密度对机采辣椒品种性状和产量的影响[J]. 热带作物学报,2021,42(5):1342-1347.
Wang Y, Mou Y M, Zhang A M, et al. Effects of different planting densities on the traits and yield of machine-harvested pepper varieties [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2021, 42(5): 1342-1347.
- [11] 范盼盼,谢瑞芝,明 博,等. 基于不同叶位受光条件的玉米冠层光合生产能力分析[J]. 玉米科学,2017,25(5):73-77.
Fan P P, Xie R Z, Ming B, et al. Analysis of maize canopy photosynthetic productivity based on different leaf position light conditions [J]. Maize Science, 2017, 25(5): 73-77.
- [12] 张 娜,冯 璐,李 玲,等. 不同种植密度对南疆机采棉叶片生理特性及产量的影响[J]. 中国农业大学学报,2021,26(5):22-29.
Zhang N, Feng L, Li L, et al. Effects of different planting densities on leaf physiological characteristics and yield of mechanically harvested cotton in Nanjiang [J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(5): 22-29.
- [13] 吕丽华,陶洪斌,夏来坤,等. 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(3):447-455.
Lü L H, Tao H B, Xia L K, et al. Canopy structure and photosynthetic characteristics of summer maize under different planting densities [J]. Acta Agronomica Sinica, 2008(3): 447-455.
- [14] 孙宏勇,刘昌明,张喜英,等. 不同行距对冬小麦麦田蒸发、蒸散和产量的影响[J]. 农业工程学报,2006(3):22-26.
Sun H Y, Liu C M, Zhang X Y, et al. Effects of different row spacing on evaporation, evapotranspiration and yield of winter wheat [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006(3): 22-26.
- [15] Chen Z, Niu Y, Zhao R, et al. The combination of limited irrigation and high plant density optimizes canopy structure and improves the water use efficiency of cotton [J]. Agricultural Water Management, 2019, 218: 139-148.
- [16] 龚雪文,孙景生,刘 浩,等. 基于20 cm蒸发皿蒸发量制定的华北地区温室黄瓜滴灌灌水制度[J]. 应用生态学报,2015,26(11):3381-3388.
Gong X W, Sun J S, Liu H, et al. Greenhouse cucumber drip irrigation system in North China based on 20 cm evaporating pan evaporation [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(11): 3381-3388.
- [17] Ahmet Ertek, Suat Şensoy, İbrahim Gedik, et al. Irrigation scheduling based on pan evaporation values for cucumber (*Cucumis sativus* L.) grown under field conditions [J]. Agricultural Water Management, 2006, 81(1): 159-172.
- [18] Wang Z, Liu Z, Zhang Z, et al. Subsurface drip irrigation scheduling for cucumber (*Cucumis sativus* L.) grown in solar greenhouse based on 20 cm standard pan evaporation in Northeast China [J]. Scientia Horticulturae, 2009, 123(1): 51-57.
- [19] Chi H X, Wang D C, Fang Q, et al. Yield and quality response of cucumber to irrigation and nitrogen fertilization under subsurface drip irrigation in solar greenhouse [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2011(6): 921-930.
- [20] 刘小锐,黄成东,祝红伟. 叶用莴苣叶面积测定方法的研究[J]. 中国蔬菜,2020(12):78-81.
Liu X R, Huang C D, Zhu H W. Research on the method of measuring leaf area of leaf lettuce [J]. Chinese Vegetables, 2020(12): 78-81.
- [21] Marois J J, Wright D L, Wiatrak P J, et al. Effect of row width and nitrogen on cotton morphology and canopy microclimate [J]. Crop Science, 2004, 44(3): 870-877.
- [22] Konno Y. Feedback regulation of constant leaf standing crop in *Sasa tsuboiana* grasslands [J]. Ecological Research, 2010, 16(3): 459-469.
- [23] 王 竞,李 磊,王 锐,等. 不同生育期水分亏缺对酿酒葡萄光合特性、产量及品质的影响[J]. 江苏农业科学,2018,46(22):157-160.
Wang J, Li L, Wang R, et al. Effects of water deficit in different growth periods on photosynthetic characteristics, yield and quality of wine grapes [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(22): 157-160.
- [24] Zhu X G, Stephen P Long, Donald R Ort. What is the maximum efficiency with which photosynthesis can convert solar energy into biomass? [J]. Current Opinion in Biotechnology, 2008, 19(2): 153-159.
- [25] Wen Y, Darapuneni M K, Chen D, et al. Phenotypical responses of cotton and relation to lint yield under deficit irrigation schemes in semi-arid environments [J]. Agronomy Journal, 2018, 110(4).
- [26] 李 菊,张富仓,王艳丽,等. 灌水量和滴灌频率对甘肃省河西地区春玉米生长和水分利用的影响[J]. 中国农业大学学报,2021,26(10):8-20.
Li J, Zhang F C, Wang Y L, et al. Effects of irrigation amount and drip irrigation frequency on spring maize growth and water use in Hexi area of Gansu Province [J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(10): 8-20.
- [27] 杨胜举,佟 玲,吴宣毅,等. 玉米冠层辐射分布和产量对种植密度和水分的响应研究[J]. 灌溉排水学报,2021,40(8):19-26.
Yang S J, Tong L, Wu X Y, et al. Response of corn canopy radiation distribution and yield to planting density and water [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(8): 19-26.

[19] Wang X Y, Yang C H, Zhang J, et al. Image dehazing based on dark channel prior and brightness enhancement for agricultural monitoring [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(2): 170-176.

[20] Zhang J W, Wang X Y, Yang C H, et al. Image dehazing based on dark channel prior and brightness enhancement for agricultural remote sensing images from consumer-grade cameras [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 151: 196-206.

[21] He K M, Sun J, Tang X O. Single image haze removal using dark channel prior [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(12): 2341-2353.

[22] 冯昕晨, 穆平安. 基于暗通道先验的图像去雾改进 [J]. 软件导刊, 2019, 18(2): 145-147, 152.
Feng X C, Mu P A. Improvement of image dehazing based on dark channel prior [J]. Software Guide, 2019, 18(2): 145-147, 152.

[23] 周小军, 郭 佳, 周承仙, 等. 基于改进同态滤波的遥感图像去云算法 [J]. 无线电工程, 2015, 45(3): 14-18.

Zhou X J, Guo J, Zhou C X, et al. An algorithm of cloud removal for remote sensing image based on improved homomorphic filtering [J]. Radio Engineering, 2015, 45(3): 14-18.

[24] Myler H, Weeks A, Voicu L. RGB color enhancement using homomorphic filtering [J]. The International Society for Optical Engineering, 1995, 2421(1): 43-50.

[25] Wang X, Tang J, Whitty M. DeepPhenology: estimation of apple flower phenology distributions based on deep learning [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 185(2): 106-123.

[26] Kwok T Z, Sheung H, Wang C C L. Fast query for exemplar-based image completion [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2010, 19(12): 3106-3115.

[27] 裴 傲, 陈桂芬, 李昊玥, 等. 改进 CGAN 网络的光学遥感图像云去除方法 [J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 194-202.
Pei A, Chen G F, Li H Y, et al. Method for cloud removal of optical remote sensing images using improved CGAN network [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(14): 194-202.

(上接第 120 页)

[28] 吴宣毅, 曹红霞, 郝舒雪, 等. 种植行距与灌水量对西北日光温室番茄生育和产量的影响 [J]. 农业工程学报, 2018, 34(24): 81-89.
Wu X Y, Cao H X, Hao S X, et al. Effects of planting row spacing and irrigation volume on tomato growth and yield in northwest solar greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(24): 81-89.

[29] 龚雪文, 刘 浩, 孙景生, 等. 日光温室番茄不同空间尺度蒸散量变化及主控因子分析 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(8): 166-175.
Gong X W, Liu H, Sun J S, et al. Variation of evapotranspiration in different spatial scales for solar greenhouse tomato and its controlling meteorological factors [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(8): 166-175.

[30] 杨北方, 杨国正, 冯 璐, 等. 亏缺灌溉对棉花生长和水分利用效率的影响研究进展 [J]. 应用生态学报, 2021, 32(3): 1112-1118.
Yang B F, Yang G Z, Feng L, et al. Research progress in the effects of deficit irrigation on cotton growth and water use efficiency [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(3): 1112-1118.

[31] Shangguan Z P, Shao M A, Dyckmans J. Nitrogen nutrition and water stress effects on leaf photosynthetic gas exchange and water use efficiency in winter wheat [J]. Environmental and Experimental Botany, 2000, 44(2): 141-149.

[32] Zahid B, Ansari R, Cheema M, et al. Evaluation of deficit irrigation regime, row spacing and dual plantation of drip irrigated tomato under high tunnel [J]. Journal of Central European Agriculture, 2020, 21(4): 851-860.