

# 基于土壤含水量的灌溉制度对番茄生理、产量及水分利用效率的影响

黄媛<sup>1</sup>, 于景鑫<sup>2</sup>, 杜亚茹<sup>1</sup>, 康艺凡<sup>1</sup>, 杜鹏飞<sup>1</sup>, 田国英<sup>1</sup>

(1. 石家庄市农业信息感知与智能控制重点实验室·石家庄市农业信息化工程技术研究中心·河北省都市农业技术创新中心·石家庄市农林科学研究院 石家庄 050041; 2. 北京市农林科学院智能装备技术研究中心 北京 100097)

**摘要:**为研究不同灌溉制度对番茄生理、产量及水分利用效率的影响,以盛丰5号为材料,开展50%田间持水量(FC)、60%FC、70%FC、80%FC为灌溉开启条件的灌水试验(T1~T4),对照(CK)依据当地常用滴灌灌溉制度。试验表明,番茄结果前期和转色期,与CK相比,70%FC为开启条件的灌溉制度可显著提高番茄叶片的光合参数。番茄采收期,叶片光合能力方面,T2表现最好,但与T1、T3、T4、CK无显著差异;果实品质方面,T1处理维生素C含量较T2、T3、T4、CK分别显著提高91.96%、55.46%、62.82%、29.26%,总糖含量分别显著提高22.43%、51.13%、76.98%、28.53%,大果占比50%,特小果占比为0;经济指标方面,T1的水分利用率分别较T2、T3、T4、CK提高12.42%、135.22%、106.59%、18.36%。综合番茄生理指标、果实品质和经济指标,以50%FC为灌溉开启条件可在设施番茄秋冬茬栽培中获得较高的果实品质和商品价值,有效实现节水增效目标。

**关键词:**设施番茄;土壤水分;灌溉制度;净光合速率;果实品质;水分利用率

中图分类号:S641.2

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2023)03-064-05

## Effects of irrigation system based on soil water content on tomato physiology, yield and water use efficiency

HUANG Yuan<sup>1</sup>, YU Jingxin<sup>2</sup>, DU Yaru<sup>1</sup>, KANG Yifan<sup>1</sup>, DU Pengfei<sup>1</sup>, TIAN Guoying<sup>1</sup>

(1. Shijiazhuang Agricultural Information Perception and Intelligent Control Key Laboratory/Shijiazhuang Agricultural Information Engineering Technology Research Center/Hebei Province City Agriculture Technology Innovation Centers/Shijiazhuang Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050041, Hebei, China; 2. Intelligent Equipment Technology Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

**Abstract:** In order to study the effects of different irrigation scheduling on physiology, yield and water use efficiency of tomato, taking Shengfeng No.5 as the testing material, the irrigation experiment (indicated by T1-T4) was carried out with 50% field capacity (indicated by FC below), 60% FC, 70% FC and 80% FC as the irrigation start-up conditions. The control (CK) was based on the local drip irrigation scheduling. The results showed that the irrigation scheduling of 70% FC as the start-up condition could significantly improve the photosynthetic parameters of tomato leaves in the early fruiting stage and turning stage. T2 showed the best photosynthetic ability at harvest time, but had no significant difference with T1, T3, T4 and CK; In terms of fruit quality, the Vc content of T1 was significantly increased by 91.96%, 55.46%, 62.82% and 29.26% compared with T2, T3, T4 and CK, the total sugar was significantly increased by 22.43%, 51.13%, 76.98% and 28.53%, the proportion of big fruit was 50%, and the proportion of mini-fruit was 0; In terms of economic indicators, the water use efficiency of T1 was increased by 12.42%, 135.22%, 106.59% and 18.36% compared with that of T2, T3, T4 and CK. Combining with the physiological indicators, fruit quality and economic indicators of tomato, taking 50% FC as the irrigation start-up condition can obtain higher fruit quality and commodity value in the autumn and winter cultivation of greenhouse tomato, and effectively realize water saving and efficiency increasing.

**Key words:** Greenhouse Tomato; Soil Moisture; Irrigation Scheduling; Net Photosynthetic Rate; Fruit Quality; Water Use Efficiency

收稿日期: 2022-04-13; 修回日期: 2022-08-31

基金项目: 河北省科技厅重点研发计划项目(21327410D); 河北省科技厅重点研发计划项目(22327401D); 石家庄市科学技术研究与  
发展计划项目(221490072A)

作者简介: 黄媛, 女, 农艺师, 主要从事作物栽培与农业信息化研究。E-mail: 13494515@qq.com

通信作者: 田国英, 男, 研究员, 主要从事作物栽培与农业信息化研究。E-mail: tguoying1@163.com

河北省是蔬菜产销大省,2020年蔬菜产量5 198.2万t,位居全国第4位,设施蔬菜快速发展,设施蔬菜产量1 258.2万t,占蔬菜总产量24.2%,2020年河北省农业用水量为107.7亿 $m^3$ ,是全省总用水量的58.93%<sup>[1]</sup>,随着资源环境约束日益加剧,农业节水提质增效成为河北省农业高质量发展的重中之重,2020年河北省喷滴灌面积达25.9万 $hm^2$ <sup>[2]</sup>,滴灌是有效减少渗漏蒸发,实现节水增效的有效途径。目前,利用土壤水分传感器实现土壤含水量监测从而制定精准的灌水制度,提高水分利用效率,是现代设施农业种植管理的重要手段。

依据灌水量、灌溉频次或土壤水分开展节水灌溉制度研究是国内设施番茄栽培的重要研究方向。其中,张坤<sup>[3]</sup>在干旱、半干旱地区从节约水资源方面考虑,研究发现75% $ET_0$ 处理的灌水量可作为番茄节水灌溉制度。郭彬等<sup>[4]</sup>研究表明,番茄在覆膜条件下,设置80%FC灌水上限可获得较高产量和较好的品质。李旭峰等<sup>[5]</sup>研究表明,番茄苗期减少50%灌水量,在保证产量的同时节约了灌水量18%。刘晓奇等<sup>[6]</sup>在番茄第一穗果坐住时(果实直径1cm)进行不同程度水分亏缺灌溉处理,结果显示,

中度水分亏缺即60%灌水量可作为日光温室基质栽培高品质番茄的灌溉制度。

大量研究结果表明,在灌溉管理中,以适当的土壤水分含水量为灌溉开启条件可增加番茄产量,提高品质和水分利用效率<sup>[7]</sup>。但研究结论不尽相同,这可能与不同地区土壤、气候条件,不同种植管理制度相关。因此,笔者立足河北省设施番茄种植环境,在典型生产型日光温室中,利用土壤水分多剖面立体监测设备,开展以不同土壤相对含水量为灌溉开启条件的灌水试验,以期通过对番茄生理、品质、产量及水分利用率的分析研究,获得高效节水的设施番茄滴灌控制制度。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况及材料

试验地点为石家庄市农林科学研究院赵县农业科技园区,试验温室为钢架结构,长度90.0m、宽度8.0m、顶高度4.5m,后墙为厚度0.5m的砖墙,覆盖材料为聚乙烯膜,种植面积489.0 $m^2$ 。试验地土质为壤土,0~40cm深土壤的物理性质及养分含量情况见表1。

表1 土壤理化性质

项目	土层深度/cm	w(田间持水量)/(g·kg <sup>-1</sup> )	土壤容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	砂粒占比/%	粉粒占比/%	黏粒占比/%	w(有机质)/(g·kg <sup>-1</sup> )	w(碱解氮)/(mg·kg <sup>-1</sup> )	w(速效磷)/(mg·kg <sup>-1</sup> )	w(速效钾)/(mg·kg <sup>-1</sup> )	pH	EC/( $\mu S \cdot cm^{-1}$ )
数值	0~40	157.70	1.58	40.00	42.70	17.30	14.55	66.97	121.17	356.33	8.30	215.00

番茄材料为盛丰5号(海泽拉启明种业北京有限公司),该品种为有限生长型,中型果,粉红果色,综合抗逆性强。苗长至5叶1心、苗高10~12cm进行定植。

### 1.2 试验设计

试验设置4个处理,灌水上限均为土壤的田间持水量(100%FC),下限分别为50%FC、60%FC、70%FC、80%FC,分别记为T1、T2、T3、T4,对照CK依据本地常用滴灌灌溉制度<sup>[8]</sup>进行灌溉。灌水湿润层为深度0~40cm土层,即依据0~40cm土壤的平均含水量作为灌水依据。

利用土壤水分多剖面立体监测设备(农芯科技,中国)对土壤水分含量(体积分数)进行监测,设备埋设至各小区南北距离正中部,垄上距番茄植株15cm处。依据NY/T 3678—2020(土壤田间持水量的测定围框淹灌仪器法)技术要求,对供试土壤最大持水量(体积分数)进行计算。定植后每5min对所在小区土壤水分进行一次测量,试验处理见表2。

表2 试验处理

处理	土壤含水量/%	
	灌水下限	灌水上限
T1	18.15	36.30
T2	21.78	
T3	25.41	
T4	29.04	
CK	本地常用滴灌灌溉制度	

### 1.3 方法

小区面积3.0m×6.7m,每个处理设置3次重复,各小区之间留2行保护行。采用高畦单行栽培,畦高20cm,畦底宽约50cm,畦面宽40cm,过道宽50cm,株距0.33m。采用滴灌灌溉,孔距0.30m,1行番茄布置1条滴灌带。

定植前按照5000kg目标产量,底肥施用有机肥(活菌数2亿·g<sup>-1</sup>,有机质40%,w,后同)1 022.49kg·hm<sup>-2</sup>,磷酸二铵(氮18%,磷46%,)141.10kg·hm<sup>-2</sup>,硝酸钾(钾52%)274.85kg·hm<sup>-2</sup>,史丹利优肽氮(氮46%)216.77kg·hm<sup>-2</sup>。番茄每穗果膨大至直径1.5cm时进行追肥,每次追复合肥(氮

13%,磷 6%,钾 40%)12.45 kg·hm<sup>-2</sup>,农用硫酸钾(钾 50%)9.75 kg·hm<sup>-2</sup>,恩乐施(氮 32%)21.90 kg·hm<sup>-2</sup>。每次追肥确保各小区在 7 d 内完成追肥,各小区总施肥量一致。

2021 年 8 月 27 日番茄苗定植,定植后 27 d 进入花期,10 月 16 日第一穗果开始膨大进行灌水试验,将试验时期划分为 3 个时期:结果前期(10 月 16 日至 11 月 15 日)、转色期(11 月 16 日至 12 月 9 日)、采收期(12 月 10—31 日)。试验至 12 月 31 日结束。各处理全生育期灌水量、灌水次数和灌水周期见表 3。

表 3 各处理灌溉情况

处理	灌水量/(m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	灌水次数	灌水周期/d
T1	1 443.17	2	63.50
T2	2 320.32	3	42.30
T3	3 439.72	4	31.75
T4	3 464.98	5	25.40
CK	1 693.46	7	18.10

#### 1.4 项目测定及方法

1.4.1 用水量 各小区分别安装水表,记录全生育期灌水量,根据种植密度计算单株耗水量(m<sup>3</sup>·株<sup>-1</sup>)。

1.4.2 作物生长、生理和果实产量、品质指标 在结果前期、转色期、采收期,利用 Li-6400 便携式光合测量仪(LI-COR,美国)测定净光合速率、气孔导度、蒸腾速率,测量位置为生长点向下第 3 片完全展开的功能叶,测量时段为光照条件较好的 09:00—12:00;采收期随机选取 3 株植株将根、茎、叶、鲜果 105 °C 杀青后转 80 °C 烘至恒质量,采用精度 0.01 g 天平称取全株生物量(kg·株<sup>-1</sup>)。

采收期各处理选取 5 株长势较为一致的番茄植株采摘一穗果称量果实质量(kg),计算单株平均产量(kg·株<sup>-1</sup>);依据果实质量进行商品等级分级,大果质量≥150 g,100 g>中果质量≥149 g,50 g>小果质量≥99 g,特小果质量≤50 g,统计各等级番茄果实数量,计算各等级果占比(%);各处理选取 5 个成熟度较为一致的果实,采用分光光度计法<sup>[9]</sup>测定番茄红素含量,采用 2,6-二氯酚靛酚钠滴定法<sup>[10]</sup>测定维生素 C 含量,采用蒽酮比色法<sup>[10]</sup>测定可溶性总糖含量,采用 NaOH 滴定法<sup>[10]</sup>测定可滴定酸含量。

1.4.3 经济指标 根据产量和耗水量计算水分利用效率:WUE<sub>y</sub>=Y/ET,根据干物质总量和灌水量计算生物量水分利用效率:WUE<sub>b</sub>=B/ET,式中 Y 为单株产量(kg·株<sup>-1</sup>),B 为干物质总量(kg·株<sup>-1</sup>),ET 为

单株耗水量(m<sup>3</sup>·株<sup>-1</sup>)<sup>[11]</sup>。

#### 1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2007 软件进行试验数据整理及图表绘制,采用 IBM SPSS Statistics 23 软件进行统计学分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同灌溉下限对番茄光合参数的影响

由表 4 可以看出,结果前期,所有处理的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率均大于对照,说明这一时期以土壤含水量为灌溉依据的灌溉制度优于以灌溉量为依据的灌溉制度,其中 T3 表现最优,且与 T1、T4、CK 差异达到显著性水平,净光合速率较 CK 提高了 170.84%,气孔导度提高了 474.15%,蒸腾速率提高 65.83%。转色期,T3 处理叶片净光合速率、气孔导度、蒸腾速率显著高于 CK,其中净光合速率较 T1、T2、T4、CK 分别提高 70.45%、

表 4 不同灌溉下限对叶片光合参数的影响

生育期	处理	净光合速率/ (μmol·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	气孔导度/ (mol·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	蒸腾速率/ (mmol·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )
结果前期	T1	4.023± 1.914 b	0.076 4± 0.038 5 b	2.312 3± 1.282 1 b
	T2	4.192± 2.499 b	0.104 1± 0.071 9 b	2.837 0± 1.252 7 ab
	T3	7.143± 3.863 a	0.404 2± 0.227 0 a	3.468 2± 0.946 2 a
	T4	4.165± 1.216 b	0.104 8± 0.049 5 b	2.271 4± 0.814 4 b
	CK	2.637± 1.168 b	0.070 4± 0.047 0 b	2.091 4± 0.932 1 b
	转色期	T1	4.995± 3.721 b	0.172 0± 0.059 2 ab
T2		7.728± 3.161 ab	0.209 5± 0.160 5 ab	3.118 8± 1.679 1 bc
T3		8.514± 2.396 a	0.277 0± 0.186 8 a	4.523 8± 2.169 2 a
T4		6.718± 4.219 ab	0.191 7± 0.116 7 ab	3.800 3± 1.463 4 ab
CK		5.332± 2.395 b	0.130 6± 0.077 9 b	2.995 2± 1.290 9 bc
采收期		T1	7.471± 4.119 a	0.153 3± 0.055 6 b
	T2	8.901± 4.577 a	0.320 6± 0.209 8 a	3.828 8± 1.892 2 a
	T3	8.216± 3.762 a	0.238 1± 0.213 3 ab	3.705 4± 1.711 1 a
	T4	5.333± 2.990 a	0.150 4± 0.122 5 b	2.838 1± 1.531 8 ab
	CK	5.000± 1.998 ab	0.102 5± 0.043 4 b	1.677 4± 0.679 5 bc

注:同一生育期同列数字后不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

10.17%、26.73%、59.68%，气孔导度分别提高了61.05%、32.22%、44.50%、112.10%，蒸腾速率分别提高了110.61%、45.05%、19.04%、51.03%。进入采收期，T2处理的光合能力增强，但净光合速率与T1、T3、T4无显著差异；T2处理气孔导度分别较T1、T3、T4、CK显著提高109.13%、34.65%、113.16%、212.78%；T2处理蒸腾速率与T3无显著差异，较T1和CK分别显著提高了230.95%和128.26%。由此可见，以70%FC为灌溉开启条件的处理在结果前期和转色期有利于叶片提高净光合速率、气孔导度和蒸腾速率，进入果实采收期，以60%FC为灌溉开启下限的灌溉制度利于提高叶片气孔导度和净光合速率，从而促进有机质的转化和积累。

## 2.2 不同灌溉下限对果实品质和分级的影响

由表5可以看出，T3处理番茄红素含量显著高于其他处理，可滴定酸含量显著低于其他处理，其中番茄红素含量分别较T1、T2、T4、CK提高了232.20%、121.05%、254.22%、222.19%，可滴定酸含量分别较T1、T2、T4、CK降低了27.78%、25.71%、38.10%、29.73%，但T3处理大果占比为38.89%，在各处理中最低；特小果占比5.56%，在各处理中最高。T1处理维生素C含量和总糖含量均显著高于其他处理，其中维生素C含量分别较T2、T3、T4、CK提高了91.96%、55.46%、62.82%、29.26%，总糖含量分别较T2、T3、T4、CK提高了22.43%、51.13%、76.98%、28.53%，同时T1处理大果占比

表5 不同灌溉下限对果实品质及分级的影响

处理	w(番茄红素)/ (mg·100 g <sup>-1</sup> )	w(维生素C)/ (mg·100 g <sup>-1</sup> )	w(总糖)/ (g·100 <sup>-1</sup> )	w(可滴定酸)/ (mg·100 g <sup>-1</sup> )	大果占比/ %	中果占比/ %	小果占比/ %	特小果占 比/%
T1	0.354±0.051 b	14.80±1.171 a	3.352±0.296 a	0.36±0.064 b	50.00	35.71	14.29	0.00
T2	0.532±0.051 b	7.71±0.709 d	2.738±0.171 b	0.35±0.029 b	46.55	39.66	12.07	1.72
T3	1.176±0.393 a	9.52±0.378 c	2.218±0.081 c	0.26±0.014 c	38.89	37.04	18.52	5.56
T4	0.332±0.038 b	9.09±0.108 c	1.894±0.024 d	0.42±0.028 a	43.48	36.96	41.30	2.17
CK	0.365±0.008 b	11.45±0.490 b	2.608±0.187 b	0.37±0.012 ab	58.54	29.27	12.20	0.00

注：同列数字后不同小写字母表示在0.05水平差异显著。下同。

50.00%，特小果占比为0。可见，较高的土壤水分含量可提高番茄红素含量，但不利于番茄果实膨大，以50%FC为灌水开启条件可显著提高番茄维生素C和总糖含量，同时促进了大果生产。

## 2.3 不同灌溉下限对经济指标的影响

由表6可以看出，T1平均每株耗水量为0.060 4 m<sup>3</sup>，分别较T2、T3、T4、CK节水37.86%、58.06%、58.37%、14.81%；不同灌溉处理下单株产量有一定差异，T2产量为2.007 kg·株<sup>-1</sup>，分别较T1、T3、T4、CK提高了43.15%、41.24%、23.13%、44.28%；利用平均单株耗水量与产量计算水分利用效率，其中以50%FC为灌水开启条件的T1处理下的水分利用效率最高，分别较T2、T3、T4、CK提高了12.42%、135.22%、106.59%、18.36%；各处理的生物量之间无显著差异，T1处理生物量水分利用效率方面同样表现最优，分别较T2、T3、T4、

CK提高了42.67%、139.21%、105.24%、2.06%。由此证明，土壤保持较高的土壤含水量导致灌溉量增加，单株耗水量提高，水分利用效率和生物量水分利用效率降低，以50%FC为灌水开启条件可达到较高的水分利用效率和生物量利用效率。

## 3 讨论与结论

番茄的光合能力受水分影响显著。土壤水分含量过低导致植物体内水分含量下降，使得叶绿素活性降低，表现为净光合速率下降，同时水分胁迫导致番茄功能叶气孔导度显著降低，作物蒸腾作用下降以减少水分蒸发，导致养分运输能力降低<sup>[12]</sup>。T1和T2处理以50%FC和60%FC为灌溉下限，在结果前期、转色期以及采收期，叶片的光合能力随土壤含水量下降而下降，这一结论与前人研究结论一致；土壤水分过高则导致土壤通气性下降，根系呼吸作用受阻，从而抑制了根系水分和养分的吸收<sup>[13]</sup>，笔者试验中T4处理以80%FC为灌溉开启条件，其叶片光合能力在各个生育期均低于T3处理。

雷成霞等<sup>[14]</sup>对地下滴灌研究表明，轻度水分亏缺可以提高作物耐旱性和节水性。菅毅等<sup>[15]</sup>对不同节水灌溉方式的研究中发现，灌水下限为65%~75%时，综合效益评价最高。在笔者的研究中，番茄

表6 不同灌溉下限对植株水分利用效率的影响

处 理	用水量/ (m <sup>3</sup> ·株 <sup>-1</sup> )	产量/ (kg·株 <sup>-1</sup> )	WUE/ (kg·m <sup>-3</sup> )	生物量/ (kg·株 <sup>-1</sup> )	WUE/ (kg·m <sup>-3</sup> )
T1	0.060 4	1.402±0.143 b	23.214	0.161±0.028 a	2.660
T2	0.097 2	2.007±0.181 a	20.649	0.181±0.034 a	1.864
T3	0.144 0	1.421±0.104 b	9.869	0.160±0.020 a	1.112
T4	0.145 1	1.630±0.283 ab	11.237	0.188±0.038 a	1.296
CK	0.070 9	1.391±0.951 b	19.613	0.185±0.060 a	2.606

结果前期和转色期,70% FC 为灌溉下限可使番茄叶片的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率最强,采收期,60% FC 为灌溉下限的光合能力进一步提高。由此可见,适度的土壤水分亏缺不仅不会抑制番茄生长,反而随着生育期推进使植株的耐旱性逐渐增强<sup>[16]</sup>,同时导致底部叶片老化速度较快,进而促进了顶部功能叶的光合能力。

不同灌溉制度下番茄果实番茄红素、维生素 C、总糖、可滴定酸含量具有一定差异。刘亭亭等<sup>[17]</sup>研究显示,始花结果期、果实生长初期、果实快速膨大期和品质形成期水分充足有利于番茄红素含量增加。笔者的研究印证了这一结论,T3 处理番茄红素显著高于其他处理 121.05%~254.22%。有学者研究显示,番茄果实中可溶性固形物、维生素 C 含量随灌水量减少而增加<sup>[18-20]</sup>。笔者的研究结果与前人结论基本一致,其中以 50% FC 为灌溉下限的 T1 处理获得了较高的维生素 C 和总糖含量,可滴定酸含量适中,果实营养含量及风味最佳。大果较中小果更具经济价值,T1 和对照组大果占比均超过 50%,且特小果率为 0,T3 处理虽然果实番茄红素较高,但大果率仅为 38.89%,且特小果率最高,由此证明,适度较低的土壤水分含量可促进大果生长,减少特小果的出现。

番茄坐果期营养生长与生殖生长同时进行,适当的水分胁迫有利于营养生长向生殖生长的转化,因此番茄植株处于一定的水分亏缺状态,水分利用效率更高<sup>[21]</sup>。张国新等<sup>[22]</sup>在对不同土壤基质势对产量及水分利用效率影响的研究中发现,随着基质势降低,灌水频次减少,水分利用效率明显提高。张辉等<sup>[23]</sup>在探讨温室膜下滴灌不同生育时期灌水控制下限与番茄产量、水分利用效率的关系时发现,水分利用效率随番茄产量增加呈抛物线型变化,产量低于  $9.69 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  时生产单位质量番茄用水较少。在笔者的研究中不同灌水制度可影响番茄产量,综合用水量以 50% FC 为灌水开启条件水分利用效率和生物量利用效率最高,可有效实现设施番茄生产节水。

在设施番茄花果期栽培管理中,不同灌溉制度对番茄植株生长、产量、品质、水分利用效率等方面均具有一定影响。综合果实品质、经济价值和水分利用效率,以 50% FC 为开启条件的灌溉制度可获得优良的果实品质和较高的经济价值,同时有效实现节水增效目标。

## 参考文献

- [1] 河北省统计局. 庆祝中国共产党成立 100 周年河北经济社会发展成就系列报告之三[EB/OL]. (2021-06-22)[2022-04-13]. <http://tjj.hebei.gov.cn/hetj/ztd/kfr12/jjzj/101629076775026.html>.
- [2] 国家统计局农村社会经济调查司. 中国农村统计年鉴 2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [3] 张坤. 不同灌溉量和滴灌频率对加工番茄生长、产量和品质的调控效应[D]. 新疆石河子: 石河子大学, 2018.
- [4] 郭彬, 莫彦, 吴忠东, 等. 覆膜与水分控制对宁夏设施滴灌番茄产量与品质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(3): 48-55.
- [5] 李旭峰, 孙西欢, 马娟娟, 等. 膜下滴灌不同水分处理对温室番茄根系活力和水分利用率的影响[J]. 节水灌溉, 2019(12): 53-57.
- [6] 刘晓奇, 肖雪梅, 王俊文, 等. 水分亏缺对日光温室基质栽培番茄果实营养和风味品质的影响[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(2): 443-453.
- [7] 程智慧, 孟焕文, Stephen A R, 等. 水分胁迫对番茄叶片气孔传导及光合色素的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2002, 30(6): 93-96.
- [8] 河北省市场监督管理局. 日光温室秋冬茬番茄滴灌水肥一体化技术规程: DB 13/T 2993—2019[S]. 石家庄: 河北省市场监督管理局, 2019.
- [9] 张连富, 丁霄霖. 番茄红素简便测定方法的建立[J]. 食品与发酵工业, 2001, 27(3): 51-55.
- [10] 高俊凤. 植物生理学实验技术[M]. 西安: 世界图书出版公司, 2000: 167-169.
- [11] 尚超, 徐凡, 李俊玲, 等. 基于主茎叶片数营养液调控下番茄生育特征和水分利用效率分析[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(S2): 26-32.
- [12] 姚磊, 杨阿明. 不同水分胁迫对番茄生长的影响[J]. 华北农学报, 1997, 12(2): 102-106.
- [13] 庞婕, 韩其晟, 周爽, 等. 水气互作对温室番茄生长、产量和水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(1): 87-94.
- [14] 雷成霞, 申孝军, 郭银. 地下滴灌条件下水分胁迫对棉花生理性状及水分利用率的影响[J]. 节水灌溉, 2020(4): 57-61.
- [15] 菅毅, 周金星, 万龙, 等. 基于 TOPSIS 方法的喀斯特断陷盆地番茄地下灌溉技术节水效益综合评价[J]. 节水灌溉, 2022(2): 89-94.
- [16] 杜兵杰, 曹红霞, 裴书瑶, 等. 亏缺灌溉下温室番茄生长生理指标对生物炭的响应[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(10): 43-51.
- [17] 刘亭亭, 胡田田, 陈思. 番茄中番茄红素含量对各生育阶段土壤水分的响应[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(4): 168-176.
- [18] 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.
- [19] 安顺伟, 王永泉, 李红岭, 等. 灌水量对日光温室番茄生长、产量和品质的影响[J]. 西北农业学报, 2010, 19(3): 188-192.
- [20] 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.
- [21] 颜俊, 孙美丽, 卢姿竹, 等. 灌溉方式对设施番茄蒸腾量和水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(S2): 81-85.
- [22] 张国新, 姚玉涛, 孙叶烁, 等. 水分调控对滨海盐碱地设施番茄及土壤盐分的影响[J]. 北方园艺, 2021(11): 57-62.
- [23] 张辉, 张玉龙, 虞娜, 等. 温室膜下滴灌灌水控制下限与番茄产量、水分利用效率的关系[J]. 中国农业科学, 2006(2): 425-432.