

不同灌溉方式和灌水量对北疆加工番茄生理生长及产量的影响

赵 娣^{1,2}, 王振华^{1,2}, 张金珠¹, 李文昊^{1,2}, 王凤姣^{1,2}

(1. 石河子大学水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832000; 2. 现代节水灌溉兵团重点实验室, 新疆 石河子 832000)

摘要: 为探讨不同灌溉方式和灌水量对滴灌加工番茄生长特性、生理特性、产量及灌溉水利用效率的影响, 寻求适宜新疆干旱地区加工番茄种植的灌水组合模式, 优化干旱地区滴灌加工番茄种植管理。采用桶栽试验, 设置 3 种灌溉方式, 即分根区交替灌溉(APRI)、固定灌溉(FPRI)和常规灌溉(CI)分别与滴灌覆膜结合, 在 3 个灌溉水平(充分灌溉 1 060 mm、中度亏水 810 mm 和重度亏水 560 mm, APRI 和 FPRI 的灌水量为 CI 的 2/3)下对加工番茄株高、茎粗、叶面积指数、光合、荧光、产量、灌溉水利用效率的影响, 并得出最佳灌水组合模式。结果表明: 9 个处理间加工番茄各生育期株高变化规律均为 $CW_1 > AW_1 > CW_2 > AW_2 > FW_1 > CW_3 > AW_3 > FW_2 > FW_3$ (平均值); 茎粗变化规律均为 $AW_1 > AW_2 > CW_1 > CW_2 > AW_3 > FW_1 > CW_3 > FW_2 > FW_3$ (平均值); 叶面积指数变化规律为 $AW_1 > CW_1 > CW_2 > AW_2 > FW_1 > CW_3 > AW_3 > FW_2 > FW_3$ (平均值); 株高、茎粗和叶面积指数的最大生长速率均表现为 $AW_1 > CW_1 > CW_2 > AW_2 > FW_1 > FW_2 > CW_3 > AW_3 > FW_3$; 灌溉方式和灌水量交互作用对各生育期 P_n 和 T_r 均具有极显著影响 ($P < 0.01$), 在同一灌溉方式下, P_n 和 T_r 均随着灌水量的增加而增加, 在 AW_1 处达到最大值。 W_1 水平下, P_n 和 T_r 变化为 $APRI > CI > FPRI$ (平均值)。 W_2 和 W_3 水平下, P_n 和 T_r 变化为 $CI > APRI > FPRI$ (平均值); 灌溉方式对加工番茄各生育期功能叶 F_v/F_m 、 F_v/F_0 的影响显著 ($P < 0.01$), 对 q^p 的影响显著 ($P < 0.05$); 灌水量对加工番茄各生育期功能叶 F_v/F_m 、 F_v/F_0 的影响不显著 ($P > 0.05$), 对花果期及膨大期 q^p 及 NPQ 的影响极显著 ($P < 0.01$); 灌溉方式和灌水量交互作用均对加工番茄各生育期荧光参数的影响达到极显著水平 ($P < 0.01$)。其中, 产量(Y)最大值出现在 AW_1 处理, 为 3.41 kg/盆; 最小值出现在 FW_3 处理, 为 1.31 kg/盆, 相对增加 1.60 倍。研究认为分根区交替灌溉充分灌水条件可作为适宜本地地区的灌水组合模式, 本研究可为新疆干旱区滴灌加工番茄高效节水生产提供科学依据。

关键词: 滴灌加工番茄; 分根区交替灌溉; 光合作用; 荧光作用; 生长特性; 产量

中图分类号: S278; S641.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)06-0175-11

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.06.026

Effects of Different Irrigation Methods and Irrigation Amount on Physiological Growth and Yield of Processing Tomato in Northern Xinjiang

ZHAO Di^{1,2}, WANG Zhenhua^{1,2}, ZHANG Jinzhu¹, LI Wenhao^{1,2}, WANG Fengjiao^{1,2}

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000; 2. Key Laboratory of Modern Water-Saving Irrigation of Xinjiang Production & Construction Group, Shihezi, Xinjiang 832000)

Abstract: In order to explore the effects of different irrigation methods and irrigation amounts on the growth characteristics, physiological characteristics, yield, and irrigation water use efficiency of processing tomato under drip irrigation, the irrigation combination method suitable for processing tomato cultivation in arid regions of Xinjiang was sought to optimize the management of tomato planting in drip irrigation in arid areas. Pot test experiments were carried out on three irrigation methods (APRI, FPRI and CI) with three irrigation quotas (conventional irrigation level: 1 060 mm, moderate water deficit: 810 mm and severe water deficit: 560 mm, the irrigation quota of APRI and FPRI are two thirds as CI) coupled with drip irrigation to explore plant height, stem diameter, leaf area index, photosynthesis, fluorescence, yield, irrigation water use efficiency and optimal irrigation combination model were studied. The results showed that the variation of plant height in different growth stages of processing tomato was: $CW_1 > AW_1 > CW_2 > AW_2 > FW_1 > CW_3 > AW_3 > FW_2 > FW_3$ (average), and the change of stem diameter and leaf area index was: $AW_1 > AW_2 > CW_1 > CW_2 > AW_3 > FW_1 > CW_3 > FW_2 > FW_3$ (average), growth potential and maximum growth rate of plant height, stem diameter and leaf area index were: $AW_1 > CW_1 > CW_2 > AW_2 > FW_1 > CW_3 > AW_3 > FW_2 >$

收稿日期: 2018-07-08

资助项目: 国家重点研发计划项目“经济作物水肥一体化技术模式研究与应用”(2017YFD0201506)

第一作者: 赵娣(1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: ZD18299090258@163.com

通信作者: 王振华(1979—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事干旱区节水灌溉理论与技术研究。E-mail: wz2002027@163.com

FW₃; the interaction between irrigation method and irrigation amount had significant effects on P_n and T_r , in each growth period ($P < 0.01$). Under the same irrigation mode, P_n and T_r increased with the increase of irrigation amount. The maximum is reached at AW₁. At W₁ level, P_n and T_r change to: APRI > CI > FPRI (average value). At W₂ and W₃ levels, P_n and T_r change to: CI > APRI > FPRI (average); The effect of irrigation method on F_v/F_m and F_v/F_0 of functional leaves of processing tomato was significant ($P < 0.01$), and the effect on q^p was significant ($P < 0.05$). The amount of irrigation on functional leaves of processing tomato on F_v/F_m and F_v/F_0 was not significant ($P > 0.05$), and the effect on q^p and NPQ in flowering and expansion period was extremely significant ($P < 0.01$). The interaction between irrigation method and irrigation amount had a significant effect on the fluorescence parameters of processing tomato in each growth period ($P < 0.01$). Among them, the maximum yield (Y) appeared in AW₁ treatment, which was 149 155 kg/hm²; the minimum appeared in FW₃ treatment, which was 57 060 kg/hm², a relative increase of 2.61 times. The research suggests that the full irrigation condition of alternate root-zone irrigation can be used as a suitable irrigation combination model in this area. This study can provide a scientific basis for efficient water-saving production of processing tomato in drip irrigation in Xinjiang.

Keywords: drip irrigation pressing tomato; alternate root-zone irrigation; photosynthesis; fluorescence; growth characteristics; yield

新疆位于中国西北部,属于典型的大陆性荒漠气候,光热资源丰富,昼夜温差大、日照时间长、降水量少,有利于加工番茄产量及品质的提高。目前新疆是全球第二大和我国第一大番茄主产区,加工番茄生产能力占全国的90%以上^[1],成为新疆举足轻重的“红色产业”。加工番茄是一种需水量高的经济作物,在干旱和半干旱地区需全生育期灌溉^[2]。然而新疆水资源匮乏,年平均降水量仅147 mm,年平均蒸发量高达1 500~2 300 mm^[3],由于降水与蒸发相差悬殊,使得新疆农业的可持续发展依赖于灌溉,然而不恰当的灌溉水管理导致新疆整体灌溉水利用系数不到50%^[4]。因此,实现灌溉水的可持续利用成为农业发展的当务之急,急需采用节约灌溉水并保持相对产量而提高水分利用效率的灌溉策略来高效利用有限的水资源^[2]。

亏缺灌溉(DI)和部分根区交替灌溉(PRI)是广泛使用于干旱和半干旱地区的节水灌溉新策略^[5],PRI是DI的进一步发展,PRI可以以2种方式应用于生产实践,即分根区交替灌溉(APRI)和分根区固定灌溉(FPRI)^[6]。APRI是在作物的某些生育期或全生育期交替对部分根区进行充分灌溉,其余根区则受到人为水分胁迫的一种灌溉方式;FPRI意味着始终对一侧根系充分灌溉,而另一侧始终处于干燥中。研究^[7]表明,APRI在节水、提高作物水分利用效率和维持较高产量方面非常有效。到目前为止,APRI已被报道应用于不同的作物,如木瓜^[8]、玉米^[7]、番茄^[9-11]、葡萄^[12]和苹果^[13-14]等。Lima等^[8]发现,木瓜部分根区交替灌溉减少了25.09%的灌溉用水量,同时水分生产力较常规灌溉提高了21.21%。有学者研究^[7]表明,APRI提高了玉米叶片的光合能力,并且大大提高了玉米的水分生产效率。也有学者^[10]

发现,土壤含水量保持在60%,APRI增加了番茄根系的生长及叶片IWUE,与常规灌溉相比略有减产。交替滴灌与传统滴灌具有相当的产量,可以提高葡萄品质,并使WUE增加26.7%~46.4%^[12]。Leib等^[13]通过对苹果树的研究发现,APRI节约了大概45%~50%的灌溉水,而未对果实大小及产量造成显著影响。据推测,部分根区交替灌溉利用干湿交替所产生的根系补偿效应,促进根系对水分及矿质营养元素的吸收,优化光合产物的分配,减少生长冗余,并通过根系产生的根源信号ABA等调节气孔开度,减少奢侈蒸腾耗水,从而提高水分利用效率^[14]。尽管有关APRI对农作物水分利用效率及生长情况已经普遍报道,但对于APRI下作物光合及叶绿素荧光动力学的系统分析的关注度不高。在本研究中,为获得最大程度的节水增产模式,研究了不同程度水分亏缺对APRI盆栽加工番茄的生长特性、光合荧光指标、产量及灌溉水利用效率的影响。根据研究结果,制定了适用于新疆加工番茄的APRI计划,预计研究结果将为干旱地区的农业生产提供有益的指导。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

盆栽试验设在现代节水灌溉兵团重点实验室试验基地暨石河子大学节水灌溉试验站(44°19'28"N,85°59'47"E,海拔451 m,平均地面坡度为6‰),地处准葛尔盆地南缘天山北麓中段,属中温带大陆性气候,年均日照时间2 865 h,其中≥10℃积温3 463.50℃,≥15℃积温2 960℃,无霜期为170 d,多年平均降水量207 mm,平均蒸发量1 660 mm,昼夜温差大。土壤质地为中壤土,0—100 cm土层的平均体积质量及田间持水率(质量含水率)分别为1.60 g/cm³和18.65%。

1.2 试验设计

采用盆栽试验,供试加工番茄为新疆主栽品种“金番 3166”,由石河子市 141 团加工番茄种植农户提供。试验设 2 个因素:灌溉方式、灌水量。灌溉方式设 1/2 区域交替灌溉(APRI, 2 个区域之间轮流供水,本次灌水,区域下次灌水时不灌,本次未灌水区域为下次灌水区,记作 A)、1/2 区域固定灌溉(fixed partial root-zoon irrigation, FPRI, 始终让某特定的 1/2 区域湿润,而另外 1/2 区域始终保持干燥,记作 F)和常规灌溉(conventional root-zoon irrigation, CI, 每次对全部土壤均匀灌水,记作 C)3 个水平。参考当地生产实践灌溉经验,灌水量设充分灌水(1 060 mm, 记作 W_1)、中度亏水(810 mm, 记作 W_2)和重度亏水(560 mm, 记作 W_3)3 个水平,其中 APRI 和 FPRI 全生育期灌水总量分别为相应 CI 处理的 2/3。APRI 在 W_1 灌溉水平下的处理记作 AW_1 , 并以此类推。试验按完全方案设计,共 9 个处理,3 次重复,共 27 盆。试验在聚乙烯塑料桶(桶口直径 55 cm, 底部直径 40 cm, 高 60 cm)中进行,除常规灌溉方式外,其他各试验用桶中间均用塑料薄膜隔开,以阻止两边水分交换,塑料布中央做“V”形缺口(图 1),用于定植加工番茄。试验用土取自石河子大学节水灌溉试验站内大田土壤,为中壤土,自然晾干碾碎去石块,按容重 1.42 g/cm^3 分层装土,两边各装入 48 kg 土,共 96 kg,每桶桶底铺有纱网和细砂,播种前保持土壤水分含量为田间持水量的 80%,桶底部均匀钻有 9 个孔以增加其透气性。

1.3 盆栽管理

灌溉水取自试验基地地下浅井水,矿化度 0.87 g/L 。所有处理采用相同施肥管理,随水施肥,施肥前 30 min 滴水,停水前 30 min 结束施肥,氮、磷和钾肥分别为尿素(N 46%)、磷酸一铵(N 12%、 P_2O_5 62%)和氯化钾(K_2O 60%),全生育期施肥总量见表 1。

于 2017 年 5 月 3 日每桶移栽加工番茄 2 株,将其根系平均分成 2 部分并移栽至塑料薄膜中央,所有处理均灌水 70 mm,以保证成活率。采用医用输液管模拟滴头,可保证每个桶精确控制灌水量,灌水滴头流量 1.80 L/h ,参考当地大田加工番茄种植的常规灌水量、灌水频率及常规施肥量制定本次试验灌溉施肥制度(表 1)。试验于 8 月 14 日结束。

1.4 测定内容与方法

1.4.1 地上部形态指标测定 在番茄生长的、花期(5 月 25 日)、坐果期(6 月 2 日)、膨大 1 期(6 月 14 日)及膨大 2 期(7 月 10 日)对加工番茄植株的株高、茎粗和叶面积指数进行测定。

株高:由植株基部至主茎生长点的自然高度。

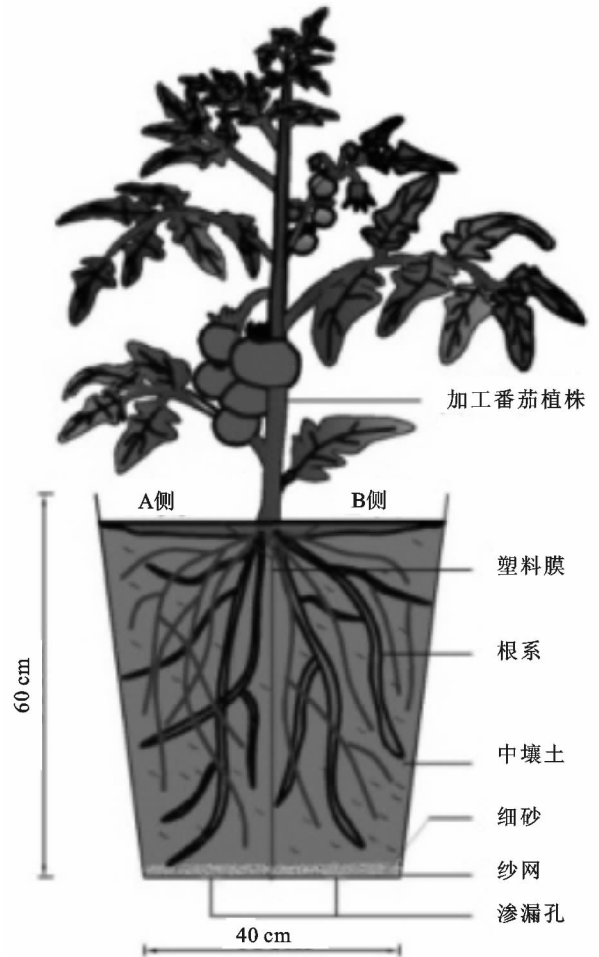


图 1 分根桶结构示意图

茎粗:为距离培养土表面 3 cm 处的横茎。

叶面积指数 LAI:利用描叶法计算得到单株叶面积 LA , $LAI = LA / (PLD \times ROWD)$ 。式中:PLD 为株距(cm);ROWD 为行距(cm)。盆栽试验中 $PLD \times ROWD = 0.1145 \text{ cm}^2$ (试验用桶表面积的 1/2)。

1.4.2 番茄植株地上部分生长指标的 Logistic 生长曲线方程 应用生物统计方法拟合番茄株高、茎粗和叶面积指数的 Logistic 生长曲线方程。Logistic 生长曲线呈拉长的“S”形曲线,对动植物生长过程的描述具有广泛的适应性。Logistic 方程为:

$$y = \frac{K}{1 + ae^{-bx}} \quad (1)$$

式中: y 为各项指标生长量的估计值; x 为植株发育时间(本试验中取定植后发育天数); K 为植株可能达到的最大生长量; a 、 b 为参数; e 为自然对数的底数。对方程(1)求一阶导数,可求得生长速率 GR (Growth Rate):

$$GR = \frac{Kabe^{-bx}}{(1 + ae^{-bx})^2} \quad (2)$$

当 $x = \ln a/b$, $y = K/2$ 时, GR 值达到最大值 MGR :

$$MGR = \frac{Kb}{4} \quad (3)$$

表 1 加工番茄全生育期灌水及施肥处理

生育阶段	时间	灌水定额/mm									施肥量/(kg·hm ⁻²)		
		交替灌溉(A)			固定灌溉(F)			常规灌溉(C)			尿素	磷酸一氮	氯化钾
		W1	W2	W3	W1	W2	W3	W1	W2	W3			
苗期	05-11	35	27	19	35	27	19	53	41	28	37.5	37.5	52.5
	05-19	35	27	19	35	27	19	53	40	28	37.5	37.5	52.5
	05-28	70	54	38	70	54	38	106	81	56	37.5	37.5	52.5
开花坐果期	06-05	70	54	38	70	54	38	106	81	56	37.5	37.5	52.5
	06-12	70	54	38	70	54	38	106	81	56	37.5	37.5	52.5
	06-19	70	54	38	70	54	38	106	81	56	37.5	37.5	52.5
	06-26	70	54	38	70	54	38	106	81	56	37.5	37.5	52.5
果实膨大期	07-04	70	54	38	70	54	38	106	81	56	37.5	37.5	52.5
	07-11	70	54	38	70	54	38	106	81	56	37.5	37.5	52.5
	07-18	70	54	38	70	54	38	106	81	56	37.5	37.5	52.5
收获期	07-25	35	27	19	35	27	19	53	41	28	37.5	37.5	52.5
	08-08	35	27	19	35	27	19	53	40	28	37.5	37.5	52.5
合计	104 d	700	540	380	700	540	380	1 060	810	560	375	375	525

1.4.3 光合指标 使用美国产 CI-340 型手持光合测量仪在加工番茄花果期(6月25日)、膨大期(7月23日)及收获期(8月7日)测定其功能叶(第3枝从上往下数第3羽状复叶的中部裂叶)光合特性,并对其标记。测定项目包括加工番茄蒸腾速率(T_r)、净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、细胞间 CO_2 浓度(C_i)光合生理指标。选取加工番茄功能叶在每个生育期晴朗无云的一天,从 8:00 时开始测量至 18:00 结束,时间间隔为 2 h,各处理连续测量 3 株,试验数据为全天测定的平均值。

1.4.4 荧光指标 在测定加工番茄光合指标的同时,使用 PAM2500 荧光仪(Walz, Germany)测定叶绿素荧光参数。在叶片暗适应 20 min 后,测得初始荧光 F_0 和最大荧光 F_m ;随后以自然光为光化光,打开饱和脉冲进行淬灭分析,测定该时间段的实际荧光产量(F_t)及光适应下的最大荧光产量(F'_m),并根据公式计算 PSII 最大光化学效率 F_v/F_m 、光化学潜在活性 F_v/F_0 、光化学淬灭系数 q^p 、非光化学淬灭系数 NPQ。

荧光指标计算参照 Roháček 方法^[15]:

$$F_v/F_m = (F_m - F_0)/F_m \quad (1)$$

$$F_v/F_0 = (F_m - F_0)/F_0 \quad (2)$$

$$q^p = (F'_m - F')/F'_m \quad (3)$$

$$NPQ = F_m/F'_m - 1 \quad (4)$$

1.4.5 产量及灌溉水利用效率测定 于加工番茄收获期(2017年7月28日至8月14日)测定产量,测定每株番茄果实鲜重。灌溉水利用效率计算公式^[16]:

$$iWUE = Y/I \quad (5)$$

式中:Y为加工番茄产量(kg/hm²);I为灌水量(m³/hm²)。

1.5 数据分析

试验数据采用 Microsoft Excel 2016 软件进行初步整理,采用 Origin Pro 2017、Auto CAD 2014 软件

绘图,采用 SPSS 22.0 软件进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 生育期主要气象环境因子变化规律

光照有效辐射(PAR)、大气温度(T_a)、大气 CO_2 浓度是影响植物进行光合作用的主要环境因素,分别在加工番茄的花果期(6月25日)、果实膨大期(7月23日)、收获期(8月7日)进行环境因子测量。随着生育期的推进,PAR、 T_a 和大气 CO_2 浓度均表现出递减的趋势,各生育期环境因子差异性显著($P < 0.05$) (表 2)。3 个生育期光照有效辐射、大气温度和大气 CO_2 浓度最大值均出现在花果期,分别为 1 712.95 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、36.69 $^\circ\text{C}$ 和 500.39 $\mu\text{mol}/\text{mol}$,最小值均出现在收获期,分别为 1 546.39 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、30.84 $^\circ\text{C}$ 和 439.88 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 。

表 2 各生育期环境因素变化规律

生育期	光照有效辐射/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	大气 温度/ $^\circ\text{C}$	大气 CO_2 浓度/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)
花果期(6月25日)	1712.95a	36.69a	500.39a
果实膨大期(7月23日)	1688.54b	34.55b	490.57ab
收获期(8月7日)	1546.39c	30.84c	439.88c

注:同列数值后不同字母表示不同生育期差异显著($P < 0.05$)。下同。

2.2 不同灌溉方式和灌水量对加工番茄地上部生长的影响

由表 3 可知,加工番茄株高和茎粗受单因素灌溉方式影响显著($P < 0.05$),受单因素灌水量影响不显著($P > 0.05$);叶面积指数受单因素灌水量影响显著($P < 0.05$),受单因素灌溉方式影响不显著($P > 0.05$);株高、茎粗、叶面积指数均受灌溉方式和灌水量交互作用影响极显著($P < 0.01$)。

加工番茄植株的株高、茎粗、叶面积指数变化规

律基本一致,即均随植株的生长发育不断增加。不同灌溉组合下加工番茄的株高变化规律为: $CW_1 > AW_1 > CW_2 > AW_2 > CW_3 > FW_1 > AW_3 > FW_2 > FW_3$ (平均值), 茎粗变化规律为: $AW_1 > AW_2 > CW_1 > CW_2 > AW_3 > FW_1 > CW_3 > FW_2 > FW_3$ (平均值)。叶面积指数变化律为 $AW_1 > CW_1 > CW_2 > AW_2 > FW_1 > CW_3 > AW_3 > FW_3$ (平均值)。在花期, AW_1 与 CW_1 的株高仅相差 1.69 cm, FW_1 下降显著, 与 CW_1 相差 4.64 cm, 其他灌溉组合均与 CW_1 差异显著 ($P < 0.05$)。随着灌溉处理天数的不断增加, 不同处理间的差异逐渐增大, 至膨大二期, CW_1 株高平均值为 61.25 cm, AW_1 、 CW_2 、 AW_2 及 FW_1 分别为 57.99, 57.88, 54.69, 52.13 cm, 与 CW_1 分别相差 3.26, 3.37, 6.56, 9.12 cm, 各处理间加工番茄株高均在 5% 水平下达到显著性差异。在花期, 加工番茄茎粗最高出现在 AW_1 处理, 为 11.97 mm, 最低出现在 FW_3 处理, 为 8.39 mm, 至膨大二期, AW_1 为 16.14 mm, AW_2 为 14.92 mm, CW_1 和 FW_1 分别为 14.85, 12.71 mm, 各处理间差异明显, AW_2 、 CW_1 和 FW_1 分别为 AW_1 的 92.44%, 92.01% 和 78.75%。根区交替灌溉 (AW_1 、 AW_2 和 AW_3) 表现出较高的茎粗优势, 较固定灌溉 (FW_1 、 FW_2 和 FW_3) 和常规灌溉 (CW_1 、 CW_2 和 CW_3) 差异显著 ($P < 0.05$)。叶面积

指数的高低在一定程度上表现生理活动旺盛程度。 AW_1 的加工番茄叶面积指数最高, 最高可达 17.59, CW_1 、 FW_1 和 AW_2 最高可达 16.26, 15.44 和 15.25, 分别为 AW_1 的 92.44%, 87.78% 和 86.70%, FW_3 最低, 仅为 AW_1 的 75.27%。试验结果表明, 与常规灌溉方式相比, 根区交替灌溉在充分灌溉条件下 (W_1) 提高了加工番茄植株茎粗和叶面积指数, 降低了株高, 但中度 (W_2) 和重度 (W_3) 水分胁迫明显抑制了加工番茄植株地上部的生长, 根区交替灌溉方式下的加工番茄植株多呈现出矮粗形态; 根区固定灌溉方式严重抑制了加工番茄植株地上部的生长。

利用表 3 中的数据进行加工番茄株高、茎粗、叶面积指数的 Logistic 生长曲线拟合, 得到曲线参数见表 4。从不同灌溉组合处理下番茄株高、茎粗和叶面积指数生长量实测值与 Logistic 方程曲线拟合可知, 9 个处理下加工番茄株高、茎粗和叶面积指数生长符合 Logistic 曲线“慢—快—慢”的规律, 拟合曲线方程与试验数据相关性均达到极显著水平 ($P < 0.01$), 拟合优度较高, 拟合方程可用于分析各指标的生长特性。从表 4 可以看出, 不同灌水组合处理下加工番茄株高、茎粗和叶面积指数的最大生长速率均表现为: $AW_1 > CW_1 > CW_2 > AW_2 > FW_1 > FW_2 > CW_3 > AW_3 > FW_3$ 。

表 3 不同灌溉组合处理下加工番茄植株的株高、茎粗和叶面积指数

处理	株高/cm				茎粗/mm				叶面积指数			
	花期	坐果期	膨大一期	膨大二期	花期	坐果期	膨大一期	膨大二期	花期	坐果期	膨大一期	膨大二期
AW_1	25.99±1.36ab	44.50±0.46bc	50.69±1.38b	57.99±0.63b	11.97±1.06a	13.11±1.23a	14.54±1.18a	16.14±1.21a	8.26±0.33a	13.25±0.53a	15.98±0.34a	17.59±0.36a
AW_2	23.88±1.52cd	41.25±1.44d	48.46±1.77c	54.69±1.02c	10.98±1.54ab	12.39±0.90ab	13.36±0.68b	14.92±0.67b	7.55±0.43bc	12.36±1.59ab	13.97±0.55cd	15.25±0.34c
AW_3	21.65±0.89d	38.89±1.05e	45.69±0.43d	50.25±1.26de	9.97±1.33cd	11.02±0.99c	11.98±1.37c	13.26±0.69c	7.07±0.42cd	11.16±0.49cd	12.88±0.59e	14.99±0.51c
FW_1	23.01±2.68cd	40.26±1.32de	45.69±1.18d	52.13±1.52d	9.58±1.14de	10.85±1.08c	11.39±0.29c	12.71±1.03c	7.53±0.34bc	11.88±0.26bc	13.91±0.47cd	15.44±0.49c
FW_2	21.16±0.53d	38.25±0.29ef	42.69±2.54e	48.47±1.61ef	8.97±1.67de	9.12±1.14d	10.36±1.56d	11.05±0.53d	6.84±0.69de	10.26±0.39de	12.51±0.41ef	14.26±0.42d
FW_3	18.39±1.05e	36.58±1.32f	40.18±2.07e	47.59±0.07f	8.39±1.24e	8.99±1.52d	9.12±1.54e	10.83±0.48d	6.35±0.23e	9.25±0.15e	11.88±0.66f	13.24±0.32e
CW_1	27.65±1.34a	46.87±0.29a	53.69±2.27a	61.25±0.96a	10.54±1.29bc	12.30±1.03ab	13.14±0.72b	14.85±0.98b	8.14±0.35ab	13.06±0.48a	14.88±0.34b	16.26±0.28b
CW_2	25.91±0.86ab	43.69±1.25b	50.61±1.16b	57.88±1.23b	10.21±1.32bc	11.39±1.27bc	12.09±1.48c	13.74±0.72c	7.65±0.22bc	12.75±0.17ab	14.57±0.38bc	16.54±0.36b
CW_3	24.84±2.33bc	42.56±0.67cd	48.98±0.77c	54.66±1.04c	9.55±1.12de	10.65±1.28c	11.55±0.98c	13.05±0.62c	7.09±0.41cd	11.66±0.33bc	13.65±0.34de	15.14±0.33c
双因素方 差分析	灌溉方式	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05
(P 检验)	灌水量	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
	灌溉方式×灌水量	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示各处理差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

2.3 不同灌溉方式和灌水量对加工番茄光合指标的影响

2.3.1 不同灌溉方式和灌水量对加工番茄 P_n 及 T_r 的影响

不同灌溉方式和灌水量下加工番茄各生育期净光合速率 (P_n) 和蒸腾速率 (T_r) 变化规律及方差分析见表 5。方差分析显示, 单因素灌水量及灌溉方式与灌水量交互作用对加工番茄各生育期 P_n 及 T_r 的影响达极显著水平 ($P < 0.01$), 单因素灌溉方式达显著水平 ($P < 0.05$)。可知, 滴灌加工番茄功能叶 P_n 在花果期达到最大值, 各处理平均值 12.52 $\mu\text{mol}/$

($\text{m}^2 \cdot \text{s}$); 膨大期有所下降, 各处理平均值为 10.77 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; 收获期降到最低, 各处理平均值 6.84 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 自花果期至收获期各处理 P_n 值递减。同一灌溉方式下, P_n 均随着灌水量的减少而不同程度降低, 中度亏水 (W_2) 降低幅度远小于重度亏水 (W_3), 其中花果期 AW_2 和 AW_3 分别较 AW_1 降低 15.17% 和 26.25%, FW_2 和 FW_3 分别较 FW_1 降低 15.83% 和 34.82%, CW_2 和 CW_3 分别较 CW_1 降低 11.81% 和 22.41%; 在 W_1 灌溉条件下, P_n 表现为: $APRI > CI > FPRI$ (平均值), $APRI$ 较 CI 和 $FPRI$

分别增加 4.20% 和 20.06%；在 W_2 和 W_3 灌溉条件下， P_n 均表现为： $CI > APRI > FPRI$ (平均值)；各生育期 P_n 最大值均出现在 AW_1 处理， AW_1 表现出明显的交互效应。说明根区交替灌溉在适应的灌水量下，对加工番茄叶片净光合速率具有一定促进作用。

由表 5 可知，不同处理滴灌加工番茄蒸腾速率 (T_r) 与 P_n 变化趋势一致，均在花果期达到最大值，各处理平均值 2.98 mmol/(m²·s)，随生育期的推进呈下降趋势，至收获期达到最小值，各处理平均值 1.87 mmol/(m²·s)，自花果期至收获期各处理 T_r 平均降低 38%。同一灌溉方式下， T_r 均表现为： $W_1 > W_2 > W_3$ (平均值)，花果期 AW_1 较 AW_2 和 AW_3 处理分别高 21.29% 和 31.25%， FW_1 较 FW_2 和 FW_3 处理分别高 23.27% 和 45.45%， CW_1 较 CW_2 和 CW_3 处理分别高 13.02% 和 23.61%；在 W_1 灌溉条件下， T_r 表现为： $APRI > CI > FPRI$ (平均值)，花果期 $APRI$ 较 CI 和 $FPRI$ 处理分别增加 7.87% 和 27.15%；在 W_2 和 W_3 灌溉条件下， T_r 均表现为： $CI > APRI > FPRI$ (平均值)； T_r 各生育期最大值均出现在 AW_1 处理中，为 3.84 mmol/(m²·s)。说明合理的灌溉组合模式有利于减少加工番茄叶片的脱落酸 (ABA) 含量，提高细胞分裂素、生长素等含量，因为提高了净光合速率和蒸腾速率。

2.3.2 不同灌溉方式和灌水定额对加工番茄 F_v/F_m 及 F_v/F_0 的影响 表 6 表示不同灌水组合对加工番茄功能叶 6 月 25 日 (花果期)、7 月 23 日 (膨大期) 及 8 月 7 日 (收获期) F_v/F_m 和 F_v/F_0 的影响。从表 6 可知， F_v/F_m 和 F_v/F_0 均随生育期的推进不断减小，至收获期达到最小值。其中，单因素灌水量对加工番茄各生育期功能叶 F_v/F_m 和 F_v/F_0 的影响不显著 ($P > 0.05$)，单因素灌溉方式对加工番茄各生育期 F_v/F_m 和 F_v/F_0

的影响达到极显著水平 ($P < 0.01$)，灌溉方式和灌水量交互作用对加工番茄各生育期 F_v/F_m 和 F_v/F_0 的影响达到极显著水平 ($P < 0.01$)。

表 4 不同灌溉组间加工番茄地上部指标生长量的 Logistic 模型拟合参数

处理	Logistic 方程参数			相关系数 R^2	最大生长速率 MGR	
	K	a	b			
株高	AW_1	80.8546	5.4123	0.0425	0.9912**	0.8591
	AW_2	70.2145	5.0213	0.0361	0.9903**	0.6337
	AW_3	62.4568	4.0213	0.0254	0.9954**	0.3966
	FW_1	72.5987	5.0325	0.0312	0.9957**	0.5663
	FW_2	63.5412	5.4561	0.0355	0.9897**	0.5639
	FW_3	56.8941	4.3691	0.0215	0.9947**	0.3058
	CW_1	85.6541	5.7456	0.0351	0.9998**	0.7516
	CW_2	73.5142	5.2691	0.0382	0.9954**	0.7021
	CW_3	65.2145	5.0213	0.0321	0.9961**	0.5233
茎粗	AW_1	18.5666	2.1365	0.0416	0.9914**	0.1931
	AW_2	16.5514	2.1569	0.0294	0.9845**	0.1258
	AW_3	15.6916	2.0312	0.0285	0.9914**	0.1118
	FW_1	15.8954	1.9852	0.0313	0.9956**	0.1244
	FW_2	14.4438	2.3611	0.0342	0.9877**	0.1235
	FW_3	13.0216	1.8546	0.0215	0.9966**	0.0700
	CW_1	17.2645	1.9562	0.0372	0.9857**	0.1606
	CW_2	15.3625	2.6354	0.0355	0.9966**	0.1363
	CW_3	15.3303	1.9523	0.0268	0.9997**	0.1027
叶面积指数 LAI	AW_1	23.6915	8.5691	0.0755	0.9974**	0.4472
	AW_2	21.3654	8.2362	0.0621	0.9988**	0.3317
	AW_3	19.5221	7.5264	0.0499	0.9985**	0.2435
	FW_1	20.3698	9.6523	0.0652	0.9963**	0.3310
	FW_2	18.6652	8.6541	0.0655	0.9854**	0.3056
	FW_3	16.3352	9.6325	0.0541	0.9863**	0.2209
	CW_1	22.3365	10.3652	0.0755	0.9966**	0.4216
	CW_2	21.5362	9.6521	0.0635	0.9974**	0.3419
	CW_3	18.6524	8.4569	0.0555	0.9866**	0.2588

注：* 表示在 0.05 水平上显著相关；** 表示在 0.01 水平上显著相关。

表 5 不同灌溉组合对加工番茄 P_n 及 T_r 的影响

处理	净光合速率 P_n /($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)			蒸腾速率 T_r /($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)		
	花果期	膨大期	收获期	花果期	膨大期	收获期
AW_1	15.62±0.12a	12.68±0.07a	8.56±0.13a	3.84±0.27a	3.12±0.07a	2.56±0.09a
AW_2	13.25±0.34c	11.2±0.22c	7.14±0.20c	3.14±0.11b	2.55±0.16bc	1.98±0.14c
AW_3	11.52±0.31d	9.63±0.16e	6.21±0.17d	2.64±0.10cd	2.03±0.15e	1.46±0.42de
FW_1	13.01±0.37c	11.74±0.21b	6.95±0.30c	3.02±0.13b	2.64±0.13b	1.95±0.18c
FW_2	10.95±0.17e	10.62±0.33d	5.33±0.19e	2.45±0.13d	2.15±0.21de	1.61±0.48d
FW_3	8.48±0.11f	7.41±0.18f	4.81±0.09f	2.11±0.13e	1.73±0.039f	1.34±0.32e
CW_1	14.99±0.14b	12.35±0.14a	8.12±0.14a	3.56±0.08a	3.01±0.14a	2.34±0.63b
CW_2	13.22±0.63c	11.65±0.41bc	7.888±0.33b	3.15±0.28b	2.67±0.13b	2.01±0.11c
CW_3	11.63±0.25d	9.65±0.43e	6.52±0.21d	2.88±0.17bc	2.34±0.21cd	1.55±0.88d
双因素	灌溉方式	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
方差分析	灌水量	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
(P 检验)	灌溉方式×灌水量	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

F_v/F_m 是指经过充分暗适应的叶片在没有经受任何环境胁迫下的 PSII 的最大 (潜在) 光化学量子效率，反

映了植物的光合潜能， F_v/F_m 值的变化代表 PSII 反应中心光化学效率的变化，一般植物在 0.75~0.85，也叫

作开放的 PSII 反应中心的能量捕获效率^[17]。由表 6 可知,滴灌加工番茄功能叶 F_v/F_m 在花果期达到最大值,各处理平均值 0.77;膨大期有所下降,各处理平均值为 0.73;收获期降到最低,各处理平均值 0.61,自花果期至收获期各处理 F_v/F_m 值呈现出递减的趋势。在同一灌溉方式下,加工番茄各生育期功能叶的 F_v/F_m 值随着灌水量的减少而降低,均在 AW_1 处取得最大值, FW_3 处取得最小值。在 W_1 水平下,花果期 APRI 较 FPRI 和 CI 处理分别提高 7.59% 和 2.41%;在 W_2 水平下,花果期 APRI 较 FPRI 处理高 1.28%,较 CI 处理相等;在 W_3 水平下,花果期 APRI 较 FPRI 处理高 1.43%,较 CI 处理降低 1.39%。

F_v/F_0 反映 PSII 潜在的光化学活性,与由活性

的 PSII 反映中心数量成正比^[18]。由表 6 可知,滴灌棉花功能叶 F_v/F_0 在花果期达到最大值,各处理平均值 4.15;膨大期有所下降,各处理平均值为 3.92;收获期降到最低,各处理平均值 3.58,自花果期至收获期各处理 F_v/F_0 值呈现出递减的趋势。在同一灌溉方式下,加工番茄各生育期功能叶的 F_v/F_0 值随着灌水量的减少而降低,均在 AW_1 处取得最大值, FW_3 处取得最小值。 W_1 水平下, F_v/F_0 变化为:APRI>CI>FPRI(平均值)。 W_2 和 W_3 水平下, F_v/F_0 变化为:CI>APRI>FPRI(平均值)。在 W_1 水平下,花果期 APRI 比 CI 和 FPRI 处理分别高 2.47% 和 7.29%。在 W_2 水平下,花果期 APRI 比 FPRI 处理高 3.51%,比 CI 低 2.36%。

表 6 不同灌溉组合对加工番茄 F_v/F_m 及 F_v/F_0 的影响

处理	F_v/F_m			F_v/F_0		
	花果期	膨大期	收获期	花果期	膨大期	收获期
AW_1	0.85±0.02a	0.80±0.01a	0.68±0.02a	4.56±0.08a	4.22±0.02a	3.86±0.02a
AW_2	0.79±0.01b	0.74±0.04bc	0.64±0.05b	4.13±0.01d	3.99±0.04b	3.65±0.03c
AW_3	0.71±0.03c	0.69±0.01e	0.53±0.05e	3.97±0.02e	3.67±0.06e	3.45±0.04ef
FW_1	0.79±0.01b	0.74±0.01bc	0.61±0.03c	4.25±0.01c	3.99±0.02b	3.57±0.01d
FW_2	0.78±0.03c	0.72±0.02cd	0.58±0.02d	3.99±0.01e	3.74±0.04d	3.41±0.03f
FW_3	0.70±0.02d	0.67±0.03e	0.54±0.01e	3.79±0.03f	3.53±0.03f	3.32±0.02g
CW_1	0.83±0.04a	0.78±0.01a	0.67±0.02ab	4.45±0.02b	4.20±0.02a	3.78±0.01a
CW_2	0.79±0.03b	0.74±0.05b	0.65±0.06b	4.23±0.04c	4.01±0.05b	3.66±0.04c
CW_3	0.72±0.02c	0.69±0.01de	0.57±0.05d	4.01±0.05e	3.88±0.03c	3.51±0.06de
双因素	灌溉方式	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
方差分析	灌水量	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05
(P 检验)	灌溉方式×灌水量	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

2.3.2 不同灌溉方式和灌水定额对加工番茄 q^p 及 NPQ 的影响 表 7 表示不同灌水组合对加工番茄功能叶 6 月 25 日(花果期)、7 月 23 日(膨大期)及 8 月 7 日(收获期) q^p 和 NPQ 的影响。从表 7 可知, q^p 随生育期的推进逐渐减小,至收获期达到最小值。NPQ 随生育期的推进逐渐增大,至收获期达到最大值。其中,单因素灌水量对加工番茄花果期、膨大期功能叶 q^p 的影响极显著($P<0.01$),单因素灌溉方式对加工番茄各生育期 q^p 的影响显著($P<0.05$);单因素灌水量对加工番茄花果期、膨大期功能叶 NPQ 的影响极显著($P<0.01$),单因素灌溉方式对加工番茄各生育期 NPQ 无显著影响($P>0.05$),灌溉方式和灌水定额交互作用对加工番茄各生育期 q^p 和 NPQ 的影响极显著($P<0.01$)。

q^p 反映 PSII 天线色素吸收的光能用于光化学电子传递的份额,又在一定程度上反映了 PSII 反应中心的开放程度及原初电子受体 QA 的还原情况^[19]。由表 7 可知,滴灌加工番茄功能叶 q^p 在花果期达到最大值,各处理平均值 0.72;膨大期有所下降,各处理平均值为 0.57;收获期降到最低,各处理

平均值 0.46,自花果期至收获期各处理 q^p 值呈现出递减的趋势。在同一灌溉方式下,加工番茄各生育期功能叶的 q^p 值随灌水量的减少而降低。在 W_1 水平下,花果期 APRI 比 FPRI 和 CI 处理分别高 8.23% 和 2.60%; W_2 水平下,花果期 APRI 比 FPRI 处理高 5.97%,比 CI 处理低 2.82%;在 W_3 水平下,花果期 APRI 比 FPRI 处理高 6.15%,比 CI 处理低 1.43%。

NPQ 是指 PSII 反应中心聚光色素吸收的光能不能参与电子传递与同化力形成而以热能耗散的部分^[20],是光和器官的一种自我保护机制^[21]。由表 7 可知,滴灌加工番茄功能叶 NPQ 值在花果期最小,各处理平均值 0.62;膨大期有所升高,各处理平均值为 1.02;收获期达到最大值,各处理平均值为 1.52,自花果期至收获期各处理 NPQ 值逐渐增大。在同一灌溉方式下,加工番茄各生育期功能叶 NPQ 值随灌水量的减少而增加。在 W_1 水平下,花果期 FPRI 和 CI 处理分别为 APRI 处理的 131.11% 和 104.44%; W_2 水平下,花果期 FPRI 和 CI 处理分别为 APRI 处理的 137.50% 和 100.00%;在 W_3 水平下,花果期 FPRI 和 CI 处理分别为 APRI 处理的 124.29% 和 87.47%。

表 7 不同灌溉组合对加工番茄 q_p 及 NPQ 的影响

处理	q_p			NPQ			
	花果期	膨大期	收获期	花果期	膨大期	收获期	
AW ₁	0.79±0.02a	0.61±0.01a	0.52±0.02a	0.45±0.01e	0.85±0.01g	1.35±0.02f	
AW ₂	0.71±0.04bc	0.57±0.01cd	0.47±0.01bc	0.56±0.02d	0.98±0.02ef	1.47±0.03e	
AW ₃	0.69±0.01de	0.54±0.03e	0.43±0.03e	0.72±0.04c	1.12±0.01c	1.61±0.01c	
FW ₁	0.73±0.02b	0.58±0.01cd	0.46±0.01cd	0.59±0.02d	0.99±0.01e	1.49±0.01e	
FW ₂	0.67±0.01e	0.54±0.04e	0.42±0.02e	0.77±0.03b	1.16±0.03b	1.65±0.01b	
FW ₃	0.65±0.03f	0.51±0.02f	0.39±0.01f	0.87±0.01a	1.27±0.04a	1.77±0.04a	
CW ₁	0.77±0.01a	0.61±0.03ab	0.52±0.02a	0.47±0.01e	0.86±0.01g	1.37±0.01f	
CW ₂	0.73±0.02b	0.59±0.01bc	0.48±0.01b	0.56±0.02d	0.96±0.01f	1.47±0.03e	
CW ₃	0.70±0.01cd	0.56±0.01de	0.45±0.014d	0.63±0.03d	1.03±0.05d	1.53±0.02d	
双因素	灌溉方式	<0.05	<0.05	<0.05	>0.05	>0.05	>0.05
方差分析	灌水量	<0.01	<0.01	<0.05	<0.01	<0.01	<0.05
(P 检验)	灌溉方式×灌水量	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

2.4 不同灌溉方式和灌水量对加工番茄产量及水分生产力的影响

不同灌溉组合处理对加工番茄产量(Y)、灌溉水利用效率($iWUE$)和增产效益(E_i)的影响见表 8。方差分析结果显示,单因素灌溉方式对加工番茄 Y 及 $iWUE$ 影响显著($P<0.05$);单因素灌溉方式及灌溉方式与灌水定额交互作用对加工番茄 Y 及 $iWUE$ 影响极显著($P<0.01$)。

在 APRI 处理下, Y 、 $iWUE$ 均随着灌水量的增加而增加;在 FPRI 处理下, Y 、 $iWUE$ 均随着灌水量的增加而减小;在 CI 处理下, Y 、 $iWUE$ 均随着灌水量的增加呈“ \wedge ”变化。其中,加工番茄产量(Y)最大值出现在 AW₁ 处理,为 3.41 kg/盆;最小值出现在 FW₃ 处理,为 1.31 kg/盆,相对增产 1.60 倍。说明适宜的灌溉组合方式才能使加工番茄产量、灌溉水利用效率达到最优。在不同灌水组合处理下,增产效应(E_i)表现出递减的趋势,最大值出现在 AW₁ 处理。这可能是由于适宜灌水组合方式提高了加工番茄叶片超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)等的活性,使膜脂过氧化程度降低、细胞膜的稳定性增强,减缓了植株的衰老速度,提高了加工番茄单果重,近

而提高了加工番茄产量。

2.5 加工番茄产量与其生长、生理指标的相关分析

从表 9 可以看出,除水分生产力与株高、 F_v/F_m 值之间无相关性外,产量与生长指标、灌溉水利用系数、光合荧光生理指标之间的相关系数大小接近,且相关性均达到极显著水平,各指标间存在显著的正相关关系。说明植株生长及光合荧光等生理作用对产量的形成至关重要。

表 8 不同灌溉组合对加工番茄产量及灌溉水利用效率的影响

处理	单盆产量 Y/kg	单盆水利用 效率 $iWUE$ /kg	E_i / %
AW1	3.41±0.04a	3.50±0.04a	160.40
AW2	2.30±0.03c	3.06±0.01b	75.96
AW3	1.42±0.03e	2.70±0.15c	8.68
FW1	2.22±0.02c	2.28±0.11e	69.83
FW2	1.76±0.02d	2.35±0.02d	35.05
FW3	1.31±0.03e	2.49±0.17c	—
CW1	3.39±0.05a	2.32±0.14d	159.29
CW2	2.99±0.02b	2.65±0.14c	128.62
CW3	1.84±0.06d	2.34±0.17d	40.99
双因素	灌溉方式	<0.05	<0.05
方差分析	灌水量	<0.01	<0.01
(P 检验)	灌溉方式×灌水量	<0.01	<0.01

表 9 加工番茄产量与其生长、生理指标的相关系数

生长 生理指标	产量	株高	茎粗	叶面积 指数	灌溉水 利用效率	P_n	T_r	F_v/F_m	F_v/F_0
产量	1								
株高	0.897**	1							
茎粗	0.766**	0.748**	1						
叶面积指数	0.761**	0.710**	0.874**	1					
灌溉水利用效率	0.390*	0.263	0.656**	0.654**	1				
P_n	0.904**	0.846**	0.846**	0.924**	0.461*	1			
T_r	0.934**	0.769**	0.815**	0.845**	0.505**	0.917**	1		
F_v/F_m	0.881**	0.664**	0.636**	0.728**	0.344	0.845**	0.911**	1	
F_v/F_0	0.942**	0.820**	0.777**	0.830**	0.418*	0.951**	0.942**	0.890**	1

3 讨论

水分是植物最为重要的生长要素之一,不同作物在不同的生育阶段对水分的需求各不相同,尤其在植物细胞伸长生长时期对水分的亏缺最为敏感。花果期是加工番茄植株生长及产量形成的重要时期,本研究中,花果期9个处理之间加工番茄生长特性(株高、茎粗、叶面积指数)差异显著,并伴随生育期的推进差异越来越明显。与CW₁相比,AW₁虽一定程度上降低了加工番茄植株的株高,但提高了茎粗和叶面积指数,而FW₁处理株高、茎粗及叶面积指数均明显下降,植株生长被明显抑制现象,这与魏钦平等^[22]对苹果树的研究结果类似。这是由于FPRI造成土壤水分减少,一侧根系持续经受干旱胁迫,导致各器官对养分的吸收能力及根系活力显著下降;而APRI使植物根系经受干湿交替的生长环境,在土壤水分减少的情况下,刺激根系感受胁迫信号合成脱落酸(ABA)作为信号物质,该信号传递至地上部分以调节生理反应,干燥区域复水后,植株受旱程度被缓解或完全消除此外,APRI合理的湿润—干燥周期加强了大气与土壤之间的气体交换^[23],因此根部有足够的氧气供应以有利于对营养物质的吸收。同一灌溉方式下,株高、茎粗及叶面积指数随灌水量的减少而显著降低,这是由于中度和重度亏水下,干旱胁迫不能得到充分缓解,植株因此而受损严重。

光合作用是植物体内重要的代谢过程,其强弱对植物的生长、产量及其抗逆性具有重要影响。未来作物产量提高的方式将主要依靠光合作用转化度的提高^[24]。通常认为,干旱通过气孔限制和非气孔限制来抑制植物的光合作用,使得光合速率、光合产物的量下降。只有叶肉细胞间的CO₂浓度降低可以证明光合速率的降低是气孔导度降低的结果。相反,叶肉细胞间的CO₂浓度增高说明光合速率的降低是气孔导度降低的原因^[25]。本研究中,在同一灌溉方式下,P_n和T_r均随着灌水量的增加而增加,在AW₁处达到最大值。说明只有适宜的灌水组合模式才能使光合达到最高的转化效率,且生育期光合作用呈现出明显的非气孔限制因素,这与薛惠云等^[25]的研究结果相同。水分胁迫影响了植物的正常光合作用,降低了植株的P_n和T_r^[26]。本研究得出,W₁水平下,P_n和T_r变化为:APRI>CI>FPRI(平均值)。W₂和W₃水平下,P_n和T_r变化为:CI>APRI>FPRI(平均值)。表明APRI在中度和重度水分亏缺条件下均会降低植株的P_n和T_r,只有适宜的灌水量才能达到较好的光合效应。同时APRI在适宜的灌水量条件下减少了棵间蒸发,并且总灌水减少,使水分渗入土层深度降低,使较多

的水分保持在根区范围内,在一定程度上提高了灌水—土壤贮水—作物根系吸水之间的转化效率,提高水分利用效率,进而提高光合效率。

叶绿素荧光参与植物光合作用中吸收、传递、转换和碳同化等一系列复杂的过程,叶片叶绿素荧光动力学可反映任何环境因子对光合作用的影响。因此,可利用叶绿素荧光分析系统探测植物光合作用动态变化,分析估计光合机构量子效率和光合能力^[27]。F_v/F_m和F_v/F₀的变化可作为判断植物是否受光抑制的指标^[22]本试验中,在同一灌溉方式下,F_v/F_m、F_v/F₀均随着灌水量的增加而增加,在AW₁处达到最大值,在FW₃处取得最小值。W₁水平下,F_v/F_m、F_v/F₀变化为:APRI>CI>FPRI(平均值)。W₂和W₃水平下,F_v/F_m、F_v/F₀变化为:CI>APRI>FPRI(平均值)。表明分根区交替灌溉充分灌水条件下可以提高F_v/F_m、F_v/F₀,这可能是因为此条件下加工番茄根系并未遭受真正的水分胁迫,因此并没有引起光抑制和光损伤。伴随水分胁迫的加重,APRI优势降低显著,FPRI与CI处理差异显著,这是由于PSII机构被持续的干旱破坏。q^p表示PSII反应中心的开放程度,NPQ是衡量PSII反应中心非辐射能量耗散的指标^[28]。本试验发现,在同一灌溉方式下,q^p均随着灌水量的增加而增加,而NPQ随着灌水量的减少而增加,这与在柑橘、小麦和凤箱果等植物上的研究^[29-31]结果相似。植物在非生物胁迫后NPQ升高有利于加强热耗散,从而避免过剩光能对光合机构造成损伤,q^p的提高,说明PSII反应中心开放部分的比例增大,使表观光合作用电子传递速率和PSII总的光化学量子产量提高,降低了非辐射能量耗散,使叶片所吸收的光能较充分地用于光合作用,这也是AW₂处理净光合速率达到最大值的原因之一。

不同灌溉组合模式下加工番茄各生长、光合生理指标、产量之间具有密切的相关关系,P_n和T_r以及F_v/F_m、F_v/F₀、q^p、NPQ之间具有紧密联系,说明加工番茄光合作用是一个综合过程,各光合因子之间互相作用,土壤水分通过控制加工番茄T_r来影响P_n的大小。通过对加工番茄产量与其他指标的相关分析,得出产量与生长、灌溉水利用效率、光合及荧光指标间存在显著的正相关关系,说明加工番茄植株生长指标、灌溉水利用效率及光合荧光等生理指标可以作为鉴定加工番茄产量的指标,对产量的形成至关重要。

4 结论

(1)加工番茄各生育期株高、茎粗及叶面积指数均受灌溉方式和灌水量交互作用影响极显著(P<0.01)。不同灌溉组合下加工番茄的株高变化规律

为: $CW_1 > AW_1 > CW_2 > AW_2 > FW_1 > CW_3 > AW_3 > FW_2 > FW_3$ (平均值), 茎粗变化规律为: $AW_1 > AW_2 > CW_1 > CW_2 > AW_3 > FW_1 > CW_3 > FW_2 > FW_3$ (平均值), 叶面积指数变化规律为 $AW_1 > CW_1 > CW_2 > AW_2 > FW_1 > CW_3 > AW_3 > FW_2 > FW_3$ (平均值)。各处理加工番茄株高、茎粗和叶面积指数符合 Logistic 曲线“慢—快—慢”的规律, 拟合曲线方程与试验数据相关性均达到极显著水平 ($P < 0.01$), 可用于分析各指标的生长特性。不同灌溉组合处理下加工番茄株高、茎粗和叶面积指数的最大生长速率均表现为: $AW_1 > CW_1 > CW_2 > AW_2 > FW_1 > FW_2 > CW_3 > AW_3 > FW_3$ 。

(2) 加工番茄各生育期 P_n 和 T_r 均受灌溉方式和灌水量交互作用影响极显著 ($P < 0.01$)。不同处理滴灌加工番茄 P_n 和 T_r 均随生育期的推进呈现出下降趋势, 即在花果期达到最大, 收获期降到最小; 其中, 在同一灌溉方式下, P_n 和 T_r 均随着灌水量的增加而增加, 在 AW_1 处达到最大值。 W_1 水平下, P_n 和 T_r 变化为: $APRI > CI > FPRI$ (平均值)。 W_2 和 W_3 水平下, P_n 和 T_r 变化为: $CI > APRI > FPRI$ (平均值)。

(3) 加工番茄各生育期功能叶 F_v/F_m 、 F_v/F_0 、 q^p 和 NPQ 均受灌溉方式和灌水量交互作用影响极显著 ($P < 0.01$)。其中 F_v/F_m 、 F_v/F_0 、 q^p 均随着生育期的推进逐渐减小, 至收获期达到最小值。而 NPQ 随着生育期的推进逐渐增大, 至收获期达到最大值; 在同一灌溉方式下, F_v/F_m 、 F_v/F_0 、 q^p 均随着灌水量的增加而增加, 在 AW_1 处达到最大值。 W_1 水平下, F_v/F_m 、 F_v/F_0 、 q^p 变化为: $APRI > CI > FPRI$ (平均值)。 W_2 和 W_3 水平下, F_v/F_m 、 F_v/F_0 、 q^p 变化为: $CI > APRI > FPRI$ (平均值), 而 NPQ 同样表现相反的变化规律。

(4) 加工番茄产量 (Y) 与生长指标 (株高、茎粗、叶面积指数)、灌溉水利用效率、光合指标 (P_n 、 T_r) 和荧光指标 (F_v/F_m 、 F_v/F_0) 之间的相关系数大小接近, 且相关性均达到极显著水平, 各指标间存在显著的正相关关系。说明加工番茄植株生长指标、灌溉水利用效率及光合荧光等生理指标可以作为鉴定加工番茄产量的指标, 对产量的形成至关重要。

参考文献:

[1] 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.

[2] Patanè C, Tringali S, Sortino O. Effects of deficit irrigation on biomass, yield, water productivity and fruit quality of processing tomato under semi-arid mediterranean climate conditions[J]. Scientia Horticulturae, 2011, 129(4): 590-596.

[3] Wang Z, Liao R, Lin H, et al. Effects of drip irrigation levels on soil water, salinity and wheat growth in North China[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(1): 146-156.

[4] 张江辉, 王新, 丁新利, 等. 对新疆节水农业发展的几点认识[J]. 中国农村水利水电, 2001(增刊 1): 1-4.

[5] Jensen C R, Battilani A, Plauborg F, et al. Deficit irrigation based on drought tolerance and root signalling in potatoes and tomatoes[J]. Agricultural Water Management, 2010, 98(3): 403-413.

[6] Kang S, Zhang J. Controlled alternate partial root-zone irrigation: Its physiological consequences and impact on water use efficiency[J]. Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica, 2001, 55(407): 2437-2446.

[7] Wang Z, Kang S, Jensen C R, et al. Alternate partial root-zone irrigation reduces bundle-sheath cell leakage to CO_2 and enhances photosynthetic capacity in maize leaves[J]. Journal of Experimental Botany, 2012, 63(3): 1145-1153.

[8] Lima R S N D, Martins A O, Deus B C D S D, et al. Partial root-zone drying (PRD) and regulated deficit irrigation (RDI) effects on stomatal conductance, growth, photosynthetic capacity, and water-use efficiency of papaya[J]. Scientia Horticulturae, 2015, 183: 13-22.

[9] Yang L, Qu H, Zhang Y, et al. Effects of partial root-zone irrigation on physiology, fruit yield and quality and water use efficiency of tomato under different calcium levels[J]. Agricultural Water Management, 2012, 104(1): 89-94.

[10] Wang Y, Liu F, Jensen L S, et al. Alternate partial root-zone irrigation improves fertilizer-n use efficiency in tomatoes[J]. Irrigation Science, 2013, 31(4): 589-598.

[11] Wei Z, Du T, Zhang J, et al. Carbon isotope discrimination shows a higher water use efficiency under alternate partial root-zone irrigation of field-grown tomato[J]. Agricultural Water Management, 2016, 165: 33-43.

[12] Du T, Kang S, Zhang J, et al. Water use efficiency and fruit quality of table grape under alternate partial root-zone drip irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(6): 659-668.

[13] Leib B G, Caspari H W, Redulla C A, et al. Partial rootzone drying and deficit irrigation of 'Fuji' apples in a semi-arid climate[J]. Irrigation Science, 2006, 24(2): 85-99.

[14] Liu S Z, Zhang Q, Liu J, et al. Effect of partial root-zone irrigating deuterium oxide on the properties of water transportation and distribution in young apple trees[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2014, 13(6): 1268-1275.

[15] Roháčková K. Chlorophyll fluorescence parameters: The definitions, photosynthetic meaning, and mutual relationships[J]. Photosynthetica, 2002, 40(1): 13-29.

- [16] 杨小振,张显,马建祥,等.滴灌施肥对大棚西瓜生长、产量及品质的影响[J].农业工程学报,2014,30(7):109-118.
- [17] 张忠学,郑恩楠,王长明,等.不同水氮处理对水稻荧光参数和光合特性的影响[J].农业机械学报,2017,48(6):176-183.
- [18] 杜亮亮,金爱武,胡元斌,等.5种箬竹属竹种叶绿素荧光特性的比较[J].世界竹藤通讯,2009,7(2):17-21.
- [19] 冯建灿,胡秀丽,毛训甲.叶绿素荧光动力学在研究植物逆境生理中的应用[J].经济林研究,2002(4):14-18.
- [20] Souza R P, Machado E C, Silva J A B, et al. Photosynthetic gas exchange, chlorophyll fluorescence and some associated metabolic changes in cowpea (*Vigna unguiculata*) during water stress and recovery[J]. Environmental and Experimental Botany,2004,51(1):45-56.
- [21] Epron D, Dreyer E, Bréda N. Photosynthesis of oak trees [*quercus petraea* (matt.) Liebl.] during drought under field conditions: Diurnal course of net CO₂ assimilation and photochemical efficiency of photosystem II[J]. Plant Cell and Environment,2010,15(7):809-820.
- [22] 魏钦平,刘松忠,王小伟,等.分根交替不同灌水量对苹果生长和叶片生理特性的影响[J].中国农业科学,2009,42(8):2844-2851.
- [23] Tan X, Shao D, Liu H, et al. Effects of alternate wetting and drying irrigation on percolation and nitrogen leaching in paddy fields[J]. Paddy and Water Environ-
- ment,2013,11(1/4):381-395.
- [24] 朱延凯,王振华,李文昊.不同盐胁迫对滴灌棉花生理生长及产量的影响[J].水土保持学报,2018,32(2):298-305.
- [25] 薛惠云,张永江,刘连涛,等.干旱胁迫与复水对棉花叶片光谱、光合和荧光参数的影响[J].中国农业科学,2013,46(11):2386-2393.
- [26] 于文颖,纪瑞鹏,冯锐,等.不同生育期玉米叶片光合特性及水分利用效率对水分胁迫的响应[J].生态学报,2015,35(9):2902-2909.
- [27] 刘兆新,刘妍,杨坚群,等.小麦花生一体化施肥对麦套花生生理特性及产量的影响[J].水土保持学报,2018,32(1):344-351.
- [28] 王振华,朱延凯,张金珠,等.水氮调控对轻度盐化土滴灌棉花生理特性与产量的影响[J].农业机械学报,2018,49(6):296-308.
- [29] López-climent M F, Arbona V, Pérez-clemente R M, et al. Relationship between salt tolerance and photosynthetic machinery performance in citrus[J]. Environmental and Experimental Botany,2008,62(2):176-184.
- [30] 马富举,杨程,张德奇,等.灌水模式对冬小麦光合特性、水分利用效率和产量的影响[J].应用生态学报,2018,29(4):1233-1239.
- [31] 许楠,孙广玉.低温锻炼后桑树幼苗光合作用和抗氧化酶对冷胁迫的响应[J].应用生态学报,2009,20(4):761-766.

(上接第96页)

- [15] Chen Z, Luo R, Huang Z, et al. Effects of different backfill soils on artificial soil quality for cut slope revegetation: Soil structure, soil erosion, moisture retention and soil C stock[J]. Ecological Engineering,2015,83:5-12.
- [16] 张慧智,史学正,于东升,等.中国土壤温度的季节性变化及其区域分异研究[J].土壤学报,2009,46(2):227-234.
- [17] Haridasan M, Jensen R D. Effect of temperature on pressure head-water content relationship and conductivity of two soils[J]. Soil Science Society of America Journal,1971,36(5):861-865.
- [18] Jackson R D. Temperature and soil-water diffusivity relations[J]. Soil Science Society of America Journal,1963,27(4):363-366.
- [19] 朱红艳,刘利华,费良军.滴灌水湿对土壤入渗和土壤温度的影响研究[J].排灌机械工程学报. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20180302.1017.146.html>.
- [20] 高红贝,邵明安.温度对土壤水分运动基本参数的影响[J].水科学进展,2011,22(4):484-494.
- [21] An N, Hemmati S, Cui Y J. Numerical analysis of soil volumetric water content and temperature variations in an embankment due to soil-atmosphere interaction[J]. Computers and Geotechnics,2017,83:40-51.
- [22] 郭李娜,樊贵盛.旱作农田土壤表层容重年内变化特性的试验研究[J].节水灌溉,2018(1):19-23.
- [23] Van Genuchten M T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of American Journal,1980,44(5):892-898.
- [24] 潘延鑫,罗纨,贾忠华,等.基于HYDRUS模型的盐碱地土壤水盐运移模拟[J].干旱地区农业研究,2017,35(1):135-142.
- [25] 张建丰.黄土区层状土入渗特性及其指流的实验研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2004.
- [26] 余冬立,郑加兴,刘营营,等.围垦年限和土壤容重对海涂土壤水分运动参数的影响[J].农业机械学报,2015,46(2):120-125.
- [27] 尹娟,费良军,程东娟.均质土壤毛管水上升特性室内试验研究[J].农业工程学报,2007,23(6):91-94.
- [28] 雷志栋.土壤水动力学[M].北京:清华大学出版社,1988.