李翊华,张芬琴,陈修斌,等. 温室水肥耦合对甜椒生长和果期叶片光合特性的影响[J]. 江苏农业学报,2015,31(2):415-421.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2015.02.030

温室水肥耦合对甜椒生长和果期叶片光合特性的影响

李翊华[1], 张芬琴[1], 陈修斌[1], 许耀照[1], 程生慧[1], 张文斌[2]
(1.河西学院农业与生物技术学院,甘肃 张掖 734000; 2.甘肃省张掖市经济作物技术推广站,甘肃 张掖 734000)

摘要: 为探明不同水肥耦合模式对河西走廊灌漠土日光温室甜椒生长发育和产量的影响,以红色甜椒品种Thialf Rz为材料,采用裂区试验设计,研究了不同田间持水量和肥料组合耦合对甜椒生长和产量及果期叶片光合特性的影响。结果显示,在中等的土壤水分和施肥水平条件下,即土壤田间持水量达75%~90%及肥料组合为氮600 kg/hm^2+五氧化二磷450 kg/hm^2+氧化钾400 kg/hm^{2}的耦合模式下,果期甜椒植株的高度、茎粗、最大叶面积、叶片含水量及地上部和根系干质量均明显高于其他耦合模式。同时,叶片的PSⅡ原初光能转换效率(F_v/F_m)和PSⅡ活性(F_v/F_o)均表现为最大,叶片实际光化学效率(ΦPSⅡ)和光化学猝灭系数(qP)也最高,光抑制程度最低,光合速率(P_n)最大,小区产量为10.28 kg/m^2,显著高于其他处理。表明在河西走廊灌漠土日光温室中,适合甜椒生长发育的水肥耦合模式为田间持水量为75%~90%,肥料组合为氮600 kg/hm^2+五氧化二磷450 kg/hm^2+氧化钾400 kg/hm^2。

关键词: 水肥耦合;彩椒;生长;光合特性;产量
中图分类号: S626.5,S641.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2015)02-0415-07

Growth and photosynthetic characteristics at fruiting period of greenhouse pepper in response to water and fertilizer coupling

LI Yi-hua[1], ZHANG Fen-qin[1], CHEN Xiu-bin[1], XU Yao-zhao[1], CHENG Sheng-hui[1], ZHANG Wen-bin[2]
(1. *College of Agriculture and Biotechnology*, *Hexi University*, *Zhangye* 734000, *China*; 2. *Zhangye Extension Station for Commercial Crop*, *Zhangye* 734000, *China*)

Abstract: The pepper variety Thialf Rz was selected as material to study the effects of different water and fertilizer coupling modes on growth, yield and photosynthetic characteristics at fruiting period in Hexi Corridor irrigated desert soil greenhouse. The results showed that plant height, stem diameter, maximum leaf area, leaf water content, above-ground dry weight and root dry weight of greenhouse pepper in the treatment of moderate soil moisture and fertilization, which was field capacity of 75%-90% and N 600 kg/hm^2+P_2O_5 450 kg/hm^2+K_2O 400 kg/hm^2 fertilizer coupling mode, were significantly higher than those in other treatments. PSⅡ light energy conversion efficiency (F_v/F_m), PSⅡ activity (F_v/F_o), leaf actual photochemical efficiency (ΦPSⅡ), light chemical quenching coefficient (qP) and photosynthese (P_n) of greenhouse pepper were the highest, while the degree of photoinhibition was the lowest. The pepper yield reached 10.28 kg/m^2, outperforming other treatments. These results indicated that the water and fertilizer coupling mode of field capacing of 75%-90% and fertilizer combination of N 600 kg/hm^2+P_2O_5 450 kg/hm^2+K_2O 400 kg/hm^2 was suitable for the growth and development of sweet pep-

收稿日期:2014-08-07
基金项目:甘肃省科技支撑计划项目(1304NKCG137)
作者简介:李翊华(1978-),女,甘肃临洮人,硕士,讲师,从事园艺作物栽培与生理方面的研究。(Tel)15193415196;(E-mail)liyihua_lyh@163.com
通讯作者:张芬琴,(E-mail)fenqinzh@hxu.edu.cn

per in the greenhouse at irrigated desert soil of Hexi Corridor.

Key words: water and fertilizer coupling; pepper; growth; photosynthetic character; yield

河西走廊位于甘肃省西北部,在中国历史上,被称为“西北粮仓”。然而,随着水资源的日益短缺,河西走廊的农业节水问题越来越受到重视。禀赋这里的光热、土壤和气候等条件,在河西走廊灌漠土上从事温室作物生产将已是本区解决水资源缺乏问题的有效途径。近年来,甜椒(*Capsicum annuum* var. *grossum*)在本区日光温室中的种植面积在不断增加[1]。然而,在其生产过程中,因存在水肥利用不科学等问题而没有收到预期的的效果。

国内外大量研究已证明,养分和水分耦合能有效提高水肥资源的利用率[2-5]。目前,对温室蔬菜水肥耦合的研究主要集中于番茄和芹菜等水肥量化指标的管理方面[6-7],而有关河西走廊灌漠土温室中,水肥耦合对彩椒生长的影响至今未见报道。

鉴于此,本试验拟研究不同水肥耦合对河西走廊灌漠土温室中彩椒植株生长和产量及果期叶片光合特性的影响,为当地温室甜椒节水、节肥和高产栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与处理

本研究试验材料选用彩椒中红色的甜椒品种 Thialf Rz(F1-Hybrid),由 RIJK ZWAAN 公司生产。购于上海虹桥农业公司,于 2013 年 7 月 18 日采用穴盘播种育苗,播前将种子放于50 ~55 ℃温水中浸泡 15 min 后,捞出放于用 10% 的磷酸三钠溶液浸泡 20 min。再将种子放入水中浸泡 8 ~12 h,而后放于 25 ~30 ℃条件下催芽,当催芽种子70% ~80% 露白时即可播种,每穴点 1 粒种子,深度 0.8 cm。播种后保持白天25 ~30 ℃,夜间18 ~20 ℃, 出苗后白天 20 ~25 ℃,夜间13 ~18 ℃。

1.2 试验设计与种植

试验在甘肃省张掖市甘州区党寨镇下寨村日光温室内进行,温室跨度为9.0 m,脊高为4.5 m,长度为 60.0 m,墙体厚度为 1.8 m;其中土壤为灌漠土,容重为 1.12 g/cm^3,总孔度为 53.45%。耕层土壤有机质含量为 12.20 g/kg,速效氮为 64.50 mg/kg、速效磷为 6.45 mg/kg、速效钾为 182.45 mg/kg,pH 值 7.25,阳离子交换量(*CEC*)为 15.54 cmol/kg。

试验共设 3 个水分水平,即 W1:田间持水量为 90% ~100%,W2:田间持水量为 75% ~90%,W3:田间持水量为 50% ~75%。3 个肥料水平,即 F1:氮 800 kg/hm^2 + 五氧化二磷 600 kg/hm^2 + 氧化钾 500 kg/hm^2, F2:氮 600 kg/hm^2 + 五氧化二磷 450 kg/hm^2 + 氧化钾 400 kg/hm^2, F3:氮 400 kg/hm^2 + 五氧化二磷 300 kg/hm^2 + 氧化钾 300 kg/hm^2。采用裂区设计,其中,水分处理为主区,氮肥处理为副区,共 9 个处理(表 1),每处理重复 3 次。小区长 8.0 m,宽 1.2 m,面积为 9.6 m^2。氮、磷、钾肥分别为 $CO(NH_2)_2$、$NH_4H_2PO_4$ 和 K_2SO_4 提供,其中磷肥基肥一次性施入,氮肥和钾肥 50% 作为基肥,50% 作追肥在开花初期进行滴灌施肥。

2013 年 9 月 20 日当幼苗生长到七叶一心时,移栽到温室中的已整好的畦上。畦高为 20 cm,其下底宽为 80 cm,上口宽为 50 cm,沟宽为 40 cm,畦间用塑料薄膜隔开,每畦栽植 2 行,株距为 45 cm,行距为 50 cm,保苗数为 1 m^2 4 株。种植期间,利用土壤剖面水分测定仪 PR_2 每 2 d 测 1 次厚度为 0 ~ 40 cm 的土壤水分,每 15 d 取相应土层的土壤烘干校对土壤含水率。灌水量按水分上限确定,依公式 $M=r\times p\times h\times\theta_f\times(q_1-q_2)/\eta$ 计算,公式中:M 为灌水量,单位为kg/m^2;r 为土壤体积质量,单位为 1.15 g/cm^3;p 为土壤湿润比,取 100%;h 为灌水计划湿润层,取 0.4 m;θ_f 为最大田间持水率(22%);q_1 为土壤水分上限;q_2 为土壤实际含水率(以相对田间持水率表示);η 为水分利用系数,滴灌取 0.9。灌水量按小区作动态记录[8]。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 *形态指标及干物质的测定* 随机选取各处理的植株 3 株测其株高、茎粗和叶面积[9]后,将根与地上部分开,用自来水冲洗干净后,于 115 ℃下杀青 15 min 再转至 75 ℃的烘箱中烘至恒质量,计干质量。

1.3.2 *叶片组织含水量的测定* 随机选取各处理的植株 6 株,取其倒 4 叶,称鲜质量后于 105 ℃下杀青 15 min 再转至 75 ℃的烘箱中烘至恒质量,计干质量。叶片组织含水量用公式:叶片组织含水量 = (供试样品鲜质量 - 供试样品干质量)/供试样品鲜质量。

表 1 水肥耦合模式

Table 1 The modes of water and fertilizer coupling

处理	田间持水量(%)	肥料组合
W1F1	90~100	氮 800 kg/hm^2+五氧化二磷 600 kg/hm^2+氧化钾 500 kg/hm^2
W1F2	90~100	氮 600 kg/hm^2+五氧化二磷 450 kg/hm^2+氧化钾 400 kg/hm^2
W1F3	90~100	氮 400 kg/hm^2+五氧化二磷 300 kg/hm^2+氧化钾 300 kg/hm^2
W2F1	75~90	氮 800 kg/hm^2+五氧化二磷 600 kg/hm^2+氧化钾 500 kg/hm^2
W2F2	75~90	氮 600 kg/hm^2+五氧化二磷 450 kg/hm^2+氧化钾 400 kg/hm^2
W2F3	75~90	氮 400 kg/hm^2+五氧化二磷 300 kg/hm^2+氧化钾 300 kg/hm^2
W3F1	50~75	氮 800 kg/hm^2+五氧化二磷 600 kg/hm^2+氧化钾 500 kg/hm^2
W3F2	50~75	氮 600 kg/hm^2+五氧化二磷 450 kg/hm^2+氧化钾 400 kg/hm^2
W3F3	50~75	氮 400 kg/hm^2+五氧化二磷 300 kg/hm^2+氧化钾 300 kg/hm^2

1.3.3 *光合指标和叶绿素荧光参数的测定* 随机选取各处理的植株 4 株,在每株上由上到下取第 4 片功能叶,用英国 Hansatech 公司的 TPS-2 便携式光合仪,测定净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、细胞间隙 CO_2浓度(C_i) 及蒸腾速率(T_r);用英国 Hansatech 公司的 Handy PEA 植物效率分析仪测定经过暗适应 20 min 以上的叶片初始荧光(F_o)、最大荧光(F_m)、最大初始荧光(F_o')及稳态荧光(F_s)、光照条件下最大荧光(F_m'),并计算 PSⅡ原初光能转换效率(F_v/F_m)、PSⅡ活性(F_v/F_o)、实际光化学效率(ΦPSⅡ)、光化学猝灭系数(qP)和非光化学猝灭系数(qN)以及光抑制程度[10],其中,$F_v=(F_m-F_o)$,$F_v/F_o=(F_m-F_o)/F_o$,$F_v/F_m=(F_m-F_o)/F_m$,$F_v'/F_m'=(F_m'-F_o')/F_m'$,$\Phi$PSⅡ$=(F_m'-F_s)/F_m'$,$qP=(F_m'-F_s)/(F_m'-F_o)$,$qN=(F_m-F_m')/F_m'$,光抑制程度用 $1-qP/qN$ 衡量。

1.3.4 *产量测定* 于成熟期(果色变红)采收称质量,各处理取 3 个重复的平均值,按试验面积算出产量。

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 工作表对试验数据整理和作图,采用 DPS v9.05 数据处理软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 水肥耦合对温室甜椒生长的影响

从表 2 可以看出,水肥耦合模式直接影响温室甜椒植株的生长。与其他处理相比,在 W2F2 的耦合处理下,甜椒结果期的株高、茎粗、最大叶面积、叶片含水量及地上部和根系干质量明显较高,说明当土壤田间持水量达 75% ~90%,肥料组合为氮 600 kg/hm^2+五氧化二磷 450 kg/hm^2+氧化钾 400 kg/hm^{2}时,植株保持较强的生长能力,这表明在中等的土壤水分和施肥水平条件下,植株生长表现出了较强的水肥耦合效应。而在较高和较低的土壤水分条件下,施肥量过大和过小时,其水肥间可能因为产生了拮抗作用,表现为植株的生长较慢。本结果与高方胜等[11]和夏秀波等[12]的研究结果一致。

2.2 水肥耦合对温室甜椒光合特性的影响

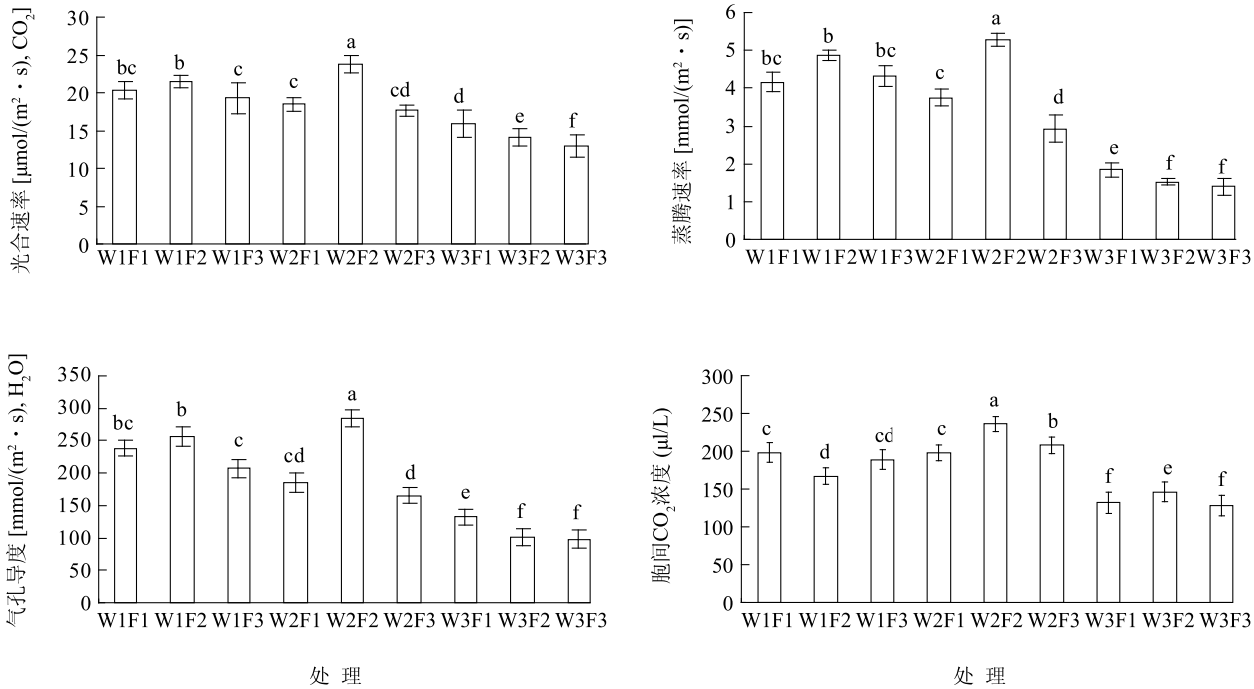
结果期叶片光合速率大小反映着产量的高低与果实灌浆充实度的强弱[13]。从图 1 可以看出,以 W2F2 处理的植株净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间 CO_2浓度最大,显著高于其他处理,说明在中等田间持水率和施肥量配比条件下,水肥耦合表现较强的互作效应,植株保持较好的光合代谢活动;其他处理由于水肥配比失调,导致植株生长不良,因此其净光合速率、蒸腾速率和气孔导度的变化表现较弱;不同处理植株叶片中胞间 CO_2浓度的变化以 W3 处理(田间持水量 50% ~75%)的变化最为强烈,这主要是由于在水分供应相对不足时,导致气孔关闭,植株蒸腾作用降低,使得植株叶片胞间 CO_2 浓度减少。

表 2　水肥耦合对温室甜椒生长的影响

Table 2　Effects of water and fertilizer coupling modes on growth of sweet pepper

处理	株高 (cm)	茎粗 (mm)	最大叶面积 (cm^2)	叶片含水量 (%)	地上部干质量 (g)	根系干质量(g)
W1F1	59.62±1.21abc	12.29±0.36b	226.53±11.28bc	83.39±3.85b	74.31±2.63ab	5.48±0.85ab
W1F2	61.54±1.85ab	13.98±0.67ab	238.91±12.31ab	88.54±6.23ab	80.76±3.01a	6.53±1.12a
W1F3	60.76±1.58ab	12.93±0.98b	229.52±11.56b	86.67±5.21ab	78.92±1.98ab	5.87±0.63ab
W2F1	58.31±1.32bc	12.36±0.83b	217.87±9.86c	84.62±4.98b	75.43±2.30ab	5.52±1.15ab
W2F2	62.31±2.15a	14.07±1.25a	240.89±13.64a	90.51±3.96a	81.43±2.12a	6.81±0.86a
W2F3	57.36±2.08bc	11.83±1.11c	215.21±8.96cd	84.48±5.06b	70.83±3.01b	5.06±0.78ab
W3F1	55.83±1.98bc	11.57±0.99c	217.79±9.36c	83.69±3.85b	62.71±2.98bc	4.78±0.91b
W3F2	54.68±1.54c	11.48±0.83c	213.46±9.27cd	84.87±4.68b	59.12±1.86c	4.39±1.02b
W3F3	53.70±1.38cd	11.05±0.76c	209.02±7.65d	85.43±6.23b	55.26±2.01c	4.12±1.04b

处理见表 1。同列不同小写字母表示处理间差异达 0.05 显著水平。



各处理见表 1。处理间不同小写字母表示处理间差异达 0.05 显著水平。

图 1　水肥耦合对甜椒光合特性的影响

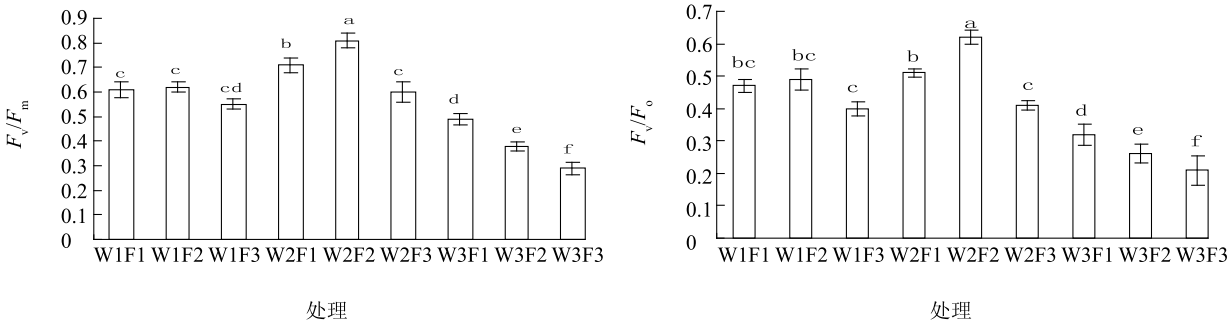
Fig. 1　Effects of water and fertilizer coupling modes on photosynthetic characteristics of sweet pepper

2.3　水肥耦合对温室甜椒叶片叶绿素荧光参数的影响

2.3.1　对 PSⅡ原初光能转换效率(F_v/F_m)和 PSⅡ活性(F_v/F_o)的影响　F_v/F_m为 PSⅡ最大光化学量子产量,该参数在非环境胁迫条件下变化较小,但光抑制下叶片荧光参数会明显变化,是反映光抑制程度的良好指标和探针;F_v/F_o反映 PSⅡ潜在活性[14]。从图 2 可以看出,F_v/F_m和 F_v/F_o变化的趋势基本相同,各处理后其变化趋势均为处理 W2F2>W2F1>W1F2>W1F1>W2F3>W1F3>W3F1>W3F2>W3F3,这表明在水肥配比过多和过少的条件下,水肥耦合效应使土壤环境

产生逆境胁迫,F_v/F_m和F_v/F_o越小,其胁迫愈严重;各处理中,W2F2 处理的F_v/F_m值最大,为0.81,F_v/F_o的值为0.62,说明在中等田间持水率和施肥量配比条件下,水肥互作效应更加剧烈,促进了植株生长健壮,这一研究结果与赵会杰等[15]的结果相一致。

2.3.2 对实际光化学效率(ΦPSⅡ)、光化学量子产量(F_v'/F_m')、光化学猝灭系数(qP)和非光化学猝灭系数(qN)和光抑制程度(1-qP/qN)的影响 从表3可以看出,W2F2 处理的ΦPSⅡ值较高,W1F1 处理的F_v'/F_m'最高,显著高于其他处理,说明中等水肥条件可提高甜椒叶片的实际光化学效率,而大水大肥处理可提高叶片PSⅡ的有效光化学量子产量。qP反映的是被PSⅡ天线色素吸收并用以光合作用的能量部分,qP越大即PSⅡ的电子传递活性愈大;qN指由非光辐射能量耗散等引起的荧光猝灭,它反映的是PSⅡ天线色素吸收的光能不能用于光合电子传递而以热的形式耗散掉的光能部分。表3显示处理 W2F2 的qP值最高,光抑制程度最低,处理 W1F1 的qN值最高,处理 W3F3 光抑制程度最高,说明在 W1(田间持水量90%~100%)和 W3(田间持水量为50%~75%)水分条件下,无论施肥量大小怎样,其水肥配比组合的各处理植株叶片的光抑制程度都会增加,这主要是由于水肥配比失调,使得水肥耦合协同作用的效果显著,导致植株发生徒长或生长不良,进而叶片光抑制程度的增加。



各处理见表1。处理间不同小写字母表示处理间差异达0.05显著水平。

图2 水肥耦合对甜椒叶片F_v/F_m和F_v/F_o的影响

Fig. 2 Effects of water and fertilizer coupling modes on F_v/F_m and F_v/F_o of pepper leaves

表3 水肥耦合对温室甜椒叶片ΦPSⅡ、F_v'/F_m'、qP、qN和光抑制程度的影响

Table 3 Effects of water and fertilizer coupling modes on Φ PSⅡ, F_v'/F_m', qP, qN and photo inhibition of pepper leaves

处理	实际光化学效率(ΦPSⅡ)	光化学量子产量(F_v'/F_m')	光化学猝灭系数(qP)	非光化学猝灭系数(qN)	光抑制程度(1-qP/qN)
W1F1	0.376±0.065ab	0.531±0.032a	0.713±0.023a	0.784±0.064a	0.091±0.002cd
W1F2	0.391±0.021ab	0.373±0.085bc	0.702±0.061a	0.765±0.058b	0.082±0.004cd
W1F3	0.275±0.032bc	0.412±0.096ab	0.682±0.089ab	0.733±0.063bc	0.070±0.001d
W2F1	0.368±0.012b	0.367±0.082bc	0.653±0.043ab	0.689±0.071c	0.052±0.008d
W2F2	0.482±0.021a	0.253±0.091d	0.752±0.021a	0.773±0.052ab	0.027±0.006d
W2F3	0.381±0.018ab	0.361±0.058bc	0.631±0.068b	0.652±0.062d	0.032±0.003d
W3F1	0.263±0.051bc	0.309±0.078c	0.583±0.035bc	0.674±0.038d	0.135±0.007c
W3F2	0.208±0.062c	0.432±0.046ab	0.512±0.024bc	0.708±0.046bc	0.277±0.005b
W3F3	0.196±0.023d	0.398±0.038b	0.496±0.067c	0.764±0.071b	0.352±0.006a

处理见表1。同列不同小写字母表示处理间差异达0.05显著水平。

2.4 水肥耦合对温室甜椒产量及成产因素的影响

甜椒产量主要由单果质量、单株结果数、单株产量和小区产量等因素构成,W2F2 处理的单果质量、单株结果数、单株产量和小区产量最高,分别为

187.21 g、14.65 个 2.74 kg 和 10.28 kg/m^2(表 4);随着施肥量的减少,植株的产量逐渐降低。表明在田间持水率为 75% ~90% 及施肥量为氮600 kg/hm^2+五氧化二磷 450 kg/hm^2+氧化钾 400 kg/hm^{2}时,甜椒产量最高,这是因为适当的土壤水分、适当的施肥能够有效提高作物光合效率[16]。这一结果与李生秀等[17]的研究结果一致。

表 4 水肥耦合对甜椒成产因素及产量的影响

Table 4 Effects of water and fertilizer coupling modes on yield components and yield of pepper

处理	单果质量 (g)	单株结果数 (个)	单株产量 (kg)	小区产量 (kg/m^2)
W1F1	168.73±8.23bcde	11.92±1.25abc	2.01±0.11b	7.54±1.25c
W1F2	175.16±6.56abcd	10.31±2.35bc	1.81±0.31bc	6.79±1.45e
W1F3	165.83±4.86cde	10.83±2.68bc	1.80±0.12bc	6.75±0.85e
W2F1	181.42±7.25ab	13.58±1.34abc	2.46±0.09a	9.23±1.02b
W2F2	187.21±8.12a	14.65±1.72a	2.74±0.25a	10.28±0.95a
W2F3	178.56±9.21abc	13.86±2.23ab	2.47±0.08a	9.26±1.11b
W3F1	164.38±6.23de	11.67±2.28abc	1.92±0.09b	7.20±0.82d
W3F2	160.87±7.22e	10.63±1.21bc	1.71±0.12bc	6.41±0.93f
W3F3	157.35±6.85e	9.82±1.98c	1.55±0.13c	5.81±1.36g

处理见表 1。同列不同小写字母表示处理间差异达 0.05 显著水平。

3 讨 论

水与肥在作物生长中所起的作用不是孤立的,而是相互作用、相互影响的[18-19],而同一作物在不同的水肥供应条件下生长情况也大不相同,水肥之间存在一定的耦合效应,而这种效应跟它们单因素的效应又有所不同[20]。本研究中,温室红色甜椒在田间持水量 75% ~90% 和肥料组合(氮 600 kg/hm^2+五氧化二磷 450 kg/hm^2+氧化钾 400 kg/hm^2)处理后,其结果期株高、茎粗、叶面积、叶片含水量及地上部和根系干质量均明显高于其他处理,这说明水肥交互作用有一定的阈值反应[21];不同水肥处理对红色甜椒的光合特性影响较大;同时,在此条件下,植株结果期叶的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间 CO_2浓度明显高于其他处理,这较好地促进了甜椒的健壮生长,使植株保持较高的代谢水平[22],此为产量提高打下了基础。本试验发现,在田间持水量 75% ~90% 和肥料组合(氮 600 kg/hm^2+五氧化二磷 450 kg/hm^2+氧化钾 400 kg/hm^2)的条件下,温室红色甜椒结果期叶片的 ΦPSⅡ值和 qP 较高;田间持水量 90% ~100% 及肥料组合(氮 800 kg/hm^2+五氧化二磷 600 kg/hm^2+氧化钾 500 kg/hm^2)处理的 F_v'/F_m' 和 qN 最高,表明在中等水肥和高水肥条件下植株能保持较高的实际光化学效率;光抑制程度在高水和低水供应状态下差异较大,这是因为在水分供应过多和过少的胁迫条件下,叶片 qP 不断下降,而 qN 不断上升,叶片内从 PSⅡ氧化侧向 PSⅡ反应中心的电子传递受到抑制,ΦPSⅡ减小,从而发生光抑制[23]。

本研究结果表明:在河西走廊灌漠土日光温室中,当田间持水率达 75% ~90% 及施肥量达氮 600 kg/hm^2+五氧化二磷 450 kg/hm^2+氧化钾 400 kg/hm^{2}时,不仅有利于甜椒的生长发育,而且有利于提高结果期叶片的光合效率,最终有利于甜椒产量的提高。

参考文献:

[1] 李 进,张雪峰,刘 燕,等. 石灰氮在大棚甜椒秋延冬栽培上的应用[J]. 江苏农业科学,2013,41(8):157-158.

[2] SHEN Y F, LI S Q, SHAO M A. Effects of spatial coupling of water and fertilizer applications on root growth characteristics and water use of winter wheat[J]. Journal of Plant Nutrition, 2013,36(1/4):515-528.

[3] 王君杰,陈 凌,王海岗,等. 水肥耦合对糜子干物质运转和产量的影响[J]. 干旱地区农业研究,2014,32(1):140-143.

[4] 冯绍元,黄冠华,王凤新,等. 滴灌棉花水肥耦合效应的田间试验研究[J]. 中国农业大学学报,1998,3(6):59-62.

[5] BANEDJSCHAFIE S, BASTANI S, WIDMOSER P, et al. Improvement of water use and N fertilizer efficiency by subsoil irrigation of winter wheat [J]. European Journal of Agronomy, 2008, 28(1): 1-7.

[6] 陈修斌,潘 林,王勤礼,等. 温室番茄水肥耦合数学模型及其优化方案研究[J]. 南京农业大学学报,2006,29 (3):138-141.

[7] 陈修斌,杨 彬,鄂利锋,等. 荒漠化地区温室芹菜水肥耦合效应量化管理指标[J]. 江苏农业学报,2008,24 (5):674-678.

[8] 韦泽秀,梁银丽,周茂娟,等. 水肥组合对日光温室黄瓜叶片生长和产量的影响[J]. 农业工程学报,2010,26(3):69-74.

[9] YOUNG Y L, SUNGBONG O H, MYONG M O H, et al. Estimation of individual leaf area, fresh weight, and dry weight of hydroponically grown cucumbers (*Cucumis sativus* L.) using leaf length, width, and SPAD value [J]. Scientia Horticulturae, 2007, 111(4): 330-334.

[10] KRAUSE G H, WEIS E. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis [J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1991, 42: 313-349.

[11] 高方胜,徐 坤,徐立功,等. 土壤水分对番茄生长发育及产量品质的影响[J]. 西北农业学报,2005,14(4): 69-72.

[12] 夏秀波,于贤昌,高俊杰. 水分对有机基质栽培番茄生理特性、品质及产量的影响[J]. 应用生态学报,2007,18(12): 2710-2714.

[13] 李 邵,薛绪掌,郭文善,等. 水肥耦合对温室盆栽黄瓜产量与水分利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2010,16(2): 376-381

[14] 朱新广,张其德,匡延云. NaCl 胁迫对 PSⅡ光能利用和耗散的影响[J]. 生物物理学报,1999,15(4):787-791.

[15] 赵会杰,邹 琦,于振文. 叶绿素荧光分析技术及其在植物光合机理研究中的应用[J]. 河南农业大学学报,2000,34(3): 248-251.

[16] 卢 成,郑世宗,何贤康. 水肥模式对温室小型西瓜水分利用及光合特性的影响研究[J]. 浙江水利科技,2007 (6):3-5.

[17] 李生秀,李世清,高亚军,等. 施用氮肥对提高旱地作物土壤水分的作用机理和效果[J]. 干旱地区农业研究,1994,12(1): 438-461.

[18] 金 轲,汪德水,蔡典雄,等. 水肥耦合效应研究Ⅱ. 不同 N、P、水配合对旱地冬小麦产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报,1999,5(1): 8-13.

[19] SHARMA B D, JALOTA S K, KAR S, et al. Effect of nitrogen and water up-take on yield of wheat [J]. Fert Res, 1992, 31: 5-8.

[20] 穆兴民. 农田水肥耦合效应与协同管理-水肥耦合效应与协同管理[M]. 北京: 中国林业出版社,1999: 44-46.

[21] 肖自添. 温室基质培番茄水氮耦合效应研究[M]. 北京: 中国农业科学院, 2008:6-18.

[22] JANOUDI A K, WIDDERS I E, FLORE J A. Water deficits and environmental factors affect photosynthesis in leaves of cucumber [J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1993, 118 (3): 366-370.

[23] 张守仁. 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论[J]. 植物学通报,1999,16(4): 444-448.

(责任编辑:袁 伟)