

秸秆生物反应堆条件下秋冬茬温室 番茄滴灌灌溉制度研究

马世林, 李 波, 王铁良

(沈阳农业大学水利学院, 辽宁 沈阳 110866)

摘要: 通过 2010 年—2011 年秋冬季温室小区对比试验, 研究了滴灌条件下秸秆生物反应堆对秋冬茬温室番茄的耗水特性及水分利用效率的影响, 利用主成分分析法确定秸秆生物反应堆条件下秋冬茬温室番茄的适宜滴灌灌溉制度。结果表明: 与对照处理相比, 秸秆生物反应堆明显增加了番茄开花坐果期和结果期的耗水强度, 其增幅分别为 27.01% ~ 50.50% 和 15.87% ~ 76.32%。秸秆生物反应堆条件下的番茄产量明显高于对照区番茄, 其增幅为 18.38% ~ 35.97%。水分利用效率亦表现出秸秆生物反应堆高于对照区的规律, 其增幅为 8.31% ~ 29.08%。当土壤水分苗期在 60% θ_f ~ 70% θ_f 、开花坐果期在 70% θ_f ~ 80% θ_f 、结果期在 70% θ_f ~ 80% θ_f 时, 对提高果实产量和水分利用效率方面的促进作用较为明显。

关键词: 秸秆生物反应堆; 温室番茄; 灌溉制度; 耗水强度; 水分利用效率; 主成分分析

中图分类号: S641.2; S275.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2014)06-0010-09

Research on the drip irrigation schedule for greenhouse tomato in autumn-winter under the condition of straw biological reactor

MA Shi-lin, LI Bo, WANG Tie-liang

(Shenyang Agricultural University, Shenyang Liaoning 110866, China)

Abstract: With a contrast experiment in greenhouse in autumn and winter of 2010 and 2011, this paper studied the influence of straw biological reactor on water use efficiency and water consumption intensity of greenhouse tomato in autumn – winter, and acquired an optional irrigation schedule on the basis of a principal components analysis. Results show that compared with control treatments, straw biological reactor significantly increases water consumption intensity of tomato in blossom-fruit stage and fruit stage with growth rates of 27.01% ~ 50.50% and 15.87% ~ 76.32% respectively; Tomato yield under the condition of straw biological reactor is significantly higher than that in contrast area with a growth rate of 18.38% ~ 35.97%; Water use efficiency is also higher with a growth rate of 8.31% ~ 29.08%; When soil moisture ranges from 60% θ_f to 70% θ_f in seedling stage, 70% θ_f to 80% θ_f in flowering & fruiting stage, 70% θ_f to 80% θ_f in fruiting stage, straw biological reactor has a significant effect on the increase of yield and water use efficiency.

Keywords: straw biological reactor; green house tomato; drip irrigation schedule; water consumption intensity; water use efficiency; principal components analysis

随着保护地蔬菜生产的发展和秸秆生物反应堆技术的推广应用, 在温室生产中应用秸秆生物反应堆技术得到普遍关注。目前, 对秸秆生物反应堆技术的理论研究主要集中在该技术对于温室生境和物化特性的改变作用。曹云娥等^[1]研究了秸秆生物反

应堆对宁夏引黄灌区设施连作土壤及蔬菜生长的影响, 结果表明: 使用秸秆生物反应堆可显著提高宁夏引黄灌区设施连作土壤质量, 一定程度上降低土壤碱性, 土壤多酚氧化酶、蔗糖酶活性也显著提高。曹永新、兰永富等^[2]研究了秸秆生物反应堆技术对土

收稿日期: 2014-04-17

基金项目: 辽宁省科技厅一般项目(12012239)

作者简介: 马世林(1984—), 男, 吉林省吉林市人, 博士研究生, 主要从事设施农业节水灌溉理论和技术研究。E-mail: mashilin@163.com。

通信作者: 李 波(1969—), 女, 辽宁省大连市人, 副教授, 博士, 主要从事设施农业节水灌溉理论和技术研究。E-mail: liboluck@126.com。

壤的改良作用和有益微生物的分解作用。由于土壤物化特性的改变同时也改变了作物的生境,相应的作物生理特性、生长规律也会发生改变。如李波、王斌等^[3]对秸秆生物反应堆技术对温室秋冬茬番茄生长环境影响的研究结果表明,应用秸秆生物反应堆技术提高地温 2℃~4℃;应用秸秆生物反应堆技术可以很好地改善土壤理化特性,并可以提高土壤的保墒能力和温室内 CO₂ 浓度。

但是目前温室内采用秸秆生物反应堆技术与微灌措施相结合的条件 下作物的耗水特性、生长规律及适宜灌溉制度方面的研究还不足。本文研究在两种技术结合条件下温室番茄的耗水特性及水分利用

效率,确定温室番茄适宜滴灌灌溉制度,以期为秋冬茬温室番茄生产的日常管理提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验概况

试验于 2010 年秋冬季节和 2011 年秋冬季节在沈阳农业大学能源综合试验基地日光温室内进行。试验区位于北纬 41°44′,东经 123°27′,年平均最高气温 29℃,年平均最低气温 -20℃,平均气温 7.0℃~8.1℃,年平均降水量 574.4~684.8 mm。温室内土壤为棕壤,田间持水量为 39%,土壤的 pH 值为 6.5,土壤的养分状况见表 1。

表 1 土壤的养分状况
Table 1 Soil nutrient status

pH	有机质 Organic matter /(g·kg ⁻¹)	全氮 Total N /(g·kg ⁻¹)	碱解氮 N Available N /(mg·kg ⁻¹)	全磷 Total P /(g·kg ⁻¹)	速效磷 Available P /(mg·kg ⁻¹)	全钾 Total K /(g·kg ⁻¹)	速效钾 Available K /(mg·kg ⁻¹)
6.5	17.5	1.053	34.604	0.763	407.789	40.376	171.835

1.2 试验设计

试验在同一温室内进行,分为两个试验小区,其中试验区 A 采用秸秆生物反应堆技术,试验区 B 为对照区,不采用秸秆反应推技术。采用重力滴灌方式灌水,出水孔间距为 30 cm。供试作物为番茄,品种为荷兰达尔文。行距为 50 cm,株距 50 cm。两个小区各设有 4 个处理,每个处理 3 次重复。每垄定植 8 株苗。以土壤水分含水量为灌水控制指标。当土壤含水量处于土壤水分控制下限范围内时开始灌水,灌水上限是田间持水量。灌水量按公式(1)进行计算^[4]。

$$M=(\theta_{\max}-\theta_{\min})\times S\times H\times p\tag{1}$$

式中, M 为灌水量(m^3); $\theta_{\max}$ 、 $\theta_{\min}$ 分别为土壤水分控制上下限(体积含水率); S 为试验小区面积(m^2); H 为计划湿润层(m); p 为湿润比,滴灌时取 $p=0.9$ 。土壤水分下限控制范围见表 2。

1.3 观测指标和测试方法

采用 Trime-T3+FM3 型时域反射仪每 3~5 d 测量一次土壤含水率,每个处理在垄沟和垄台上分别设置 1 个 TDR 管,分别测定地表以下 10 cm、20 cm、30 cm、40 cm 深处的土壤含水率,灌水前后加测。温室内地温采用模组式温度联合采集系统监测,对每个处理的 5 cm、15 cm、25 cm、35 cm 土层温度进行全天 24 h 连续监测。植株定植后,每个处理选取 12 株植株,使用卷尺、钢尺和游标卡尺每 7 天测定作物株高、径粗、叶面积。利用 PB0402 光合速率仪测定

植株的光合速率。对各处理每次采收的果实产量进行累计,得到各处理产量。各处理灌水量由安装在滴灌系统上的水表进行计量,各次灌水量之和为全生育期总灌水量。测定品质指标为:可溶性糖、维生素 c(Vc)、可溶性蛋白质、有机酸含量。

表 2 土壤水分下限控制范围/% θ_f
Table 2 The low limit range of soil moisture

处理 Treatment	苗期 Seedling stage	开花坐果期 Blossoming and fruiting stage	结果期 Fruiting stage
A1 或 B1(A1 or B1)	60~70	80~85	70~80
A2 或 B2(A2 or B2)	60~70	50~60	70~80
A3 或 B3(A3 or B3)	60~70	60~70	70~80
A4 或 B4(A4 or B4)	60~70	70~80	70~80
计划湿润层/cm Plan wetting layer	20	40	40

注:A 代表放置秸秆的试验区;B 代表无秸秆的试验对照区。灌水下限以田间持水量(θ_f)的%计,灌水上限为田间持水量。

Note:“A” stands for the straw expriment area;“B” stands for the contrast area. The low limit range of soil moisture in above table is the percentage of field capacity θ_f . The upper limit of soil moisture is field capacity θ_f .

1.4 秸秆生物反应堆建造参数

建造生物反应堆的沟尺寸为深度 20~30 cm,宽度 60~80 cm。然后填埋秸秆,试验区用菌种量按照每 90 kg·hm⁻²进行配备。使用方法是 将菌种、麦麸和水拌匀(菌种:麦麸:水=1:20:25),拌后第 4 天即使用^[6]。作物定植前在种植垄下开沟,沟深 20 cm,沟长与垄长相等。接着填加首层玉米秸秆段(5~10

cm 长,含水率 30%~40%),放于沟底层^[7]。把粉碎的秸秆撒入沟内,当深度达到 30 cm 时再均匀撒入处理好的菌种。该层菌种用量为全部用量的 30%。上面盖上一层土并再次施入发酵好的鸡肥,有机肥用量为 22 500 kg·hm⁻²。然后撒上相同数量的秸秆,将所剩余 2/3 菌种均匀地撒在第二层秸秆上,再覆土 25 cm,充分浇透水。在垄台上打气孔,一般直径可以是 3 cm,深度要碰到下面的秸秆,两孔间距为 40 cm。

1.5 数据分析方法

试验数据应用 Excel、SPSS 软件进行分析。

2 秸秆生物反应堆对番茄耗水规律影响分析

2.1 对番茄阶段耗水强度的影响分析

作物需水量亦称腾发量(Evapotranspiration),是植株蒸腾(Transpiration)和株间土壤蒸发(Evaporation)的合称,指作物在适宜的土壤水分和肥力水平下,经过正常生长发育获得高产时的植株蒸腾量、棵间蒸发量以及构成植株体的水量之和。针对番茄不同生育时期的需水量采用水量平衡分析法进行计算。

对于旱作物,在整个生育期中任何一个时段 t ,土壤计划湿润层 h 内储水量的变化可用水量平衡方程计算:

$$W_t - W_0 = W_r + P_0 + K + M - ET \quad (2)$$

式中, W_0 , W_t 为时段初和任一时间 t ,土壤计划湿润层 h 内的储水量(mm); W_r 为由于 h 增加而增加的水量(mm); P_0 为保存在 h 内的有效雨量(mm); K 为时段 t 内的地下水补给量,即 $K = kt$ (k 为 t 时段内平均每昼夜地下水补给量)(mm); M 为时段 t 内的灌溉水量(mm); ET 为时段 t 内的作物田间需水量,即 $ET = et$ (e 为 t 时段内的平均每昼夜地下水补给量)(mm)。

本试验是在温室条件下进行的非充分灌溉试验,试验中无径流量,无降雨量,因地下水埋深较深,地下水补给量可忽略。因此计算公式简化为:

$$DW = W_t - W_0 = M - ET \quad (3)$$

$$DW = sh(q_{末} - q_{初}) \quad (4)$$

式中, $q_{末}$, $q_{初}$ 为时段初和时段末的土壤体积含水率(%); h 为土壤计划湿润层深(mm); s 为试验处理小区面积(m²)。

2.1.1 对番茄开花坐果期耗水的影响 为求证秸秆生物反应堆试验区不同水分处理间开花坐果期耗水强度的差异性,对其进行方差分析。方差分析数

据来源于实际测量数据(见表 3)。单因素方差分析表明,不同水分处理间的耗水强度在 5% 水平上差异显著(见表 4)。多重比较表明,处理 1 与处理 2、4 的耗水强度存在显著差异;处理 2 与处理 1、3 的耗水强度差异显著;处理 3 与处理 2、4 的耗水强度存在显著差异;处理 4 与处理 1、3 的耗水强度存在显著差异(见表 5)。

表 3 开花坐果期番茄耗水量
Table 3 The water consumption of tomato in blossom fruit stage

处理 Treatment	开花坐果期(10月20日~11月19日) The blossom fruit stage			
	灌水量 Amount of irrigation water /mm	耗水量 Amount of water consumption /mm	土壤水变化量 Variation of soil water /mm	耗水强度 Water consumption intensity /(mm·d ⁻¹)
A1	280	342.0	7.65	5.70
A2	190	253.2	6.38	4.22
A3	250	342.6	7.47	5.71
A4	245	264.0	6.83	4.4
B1	260	81.0	13.17	1.35
B2	170	213.0	7.80	3.55
B3	210	140.4	11.49	2.34
B4	220	157.2	10.50	2.62

表 4 秸秆生物反应堆试验区番茄开花坐果期的耗水强度方差分析表

Table 4 Variance analysis for water consumption intensity of tomato in blossom fruit stage with straw biologic reactor					
组别 Comparison group	平方和 Sum of squares	df	均方 The mean square	F	显著性 Significant
组间 Between groups	5.890	3	1.963	7.414	0.011
组内 In the groups	2.119	8	0.265		
总数 Total numbers	8.009	11			

针对开花坐果期土壤水变化量、阶段耗水量的数据进行分析,并绘制对比折线图(如图 1~图 4 所示)。数据分析有如下规律:在秸秆生物反应堆试验区与对照试验区灌水量相差较小的情况下,秸秆试验区的土壤水变化量较小,对照区土壤水变化量较大,说明秸秆生物反应堆对保持和均衡土壤含水量有积极作用;不同水分处理间开花坐果期的耗水强度变化规律表明:灌水量较大的情况下,秸秆生物反应堆较对照区植株耗水量大,说明秸秆生物反应堆实现增加 CO₂ 效应、热量效应、改良土壤效应的同时需要消耗大量水分;同时 A1(B1)与 A3(B3)处理相

比较,虽然两者耗水强度近似,但 A3(B3)的水分处理水平显著低于 A1(B1),从节水的角度而言,显然 A3(B3)水分处理较优。从耗水方面来看,相同水分处理条件下,A 处理耗水强度高于 B 处理,不同水分

处理增幅由大到小依次是 1(76.32%)>4(40.45%)>3(59.02%)>2(15.87%),其主要原因是,秸秆生物反应堆在番茄生育期内会发生一定的化学变化,在变化过程中需要消耗一定量的水分。

表 5 秸秆生物反应堆试验区番茄开花坐果期的耗水强度多重比较表

Table 5 Multiple comparisons for water consumption intensity of tomato in blossom fruit stage with straw biologic reactor

检验 Inspection	(I)处理 Treatment	(J)处理 Treatment	均值差 LMSE (I - J)	标准误 SE	显著性 Significant	95% 置信区间 (95% confidence intervals)	
						下限 Lower limit	上限 Upper limit
LSD	1	2	1.48667 *	0.42019	0.008	0.5177	2.4556
		3	- 0.00333	0.42019	0.994	- 0.9723	0.9656
		4	1.30000 *	0.42019	0.015	0.3310	2.2690
	2	1	- 1.48667 *	0.42019	0.008	- 2.4556	- 0.5177
		3	- 1.49000 *	0.42019	0.008	- 2.4590	- 0.5210
		4	- 0.18667	0.42019	0.669	- 1.1556	0.7823
	3	1	0.00333	0.42019	0.994	- 0.9656	0.9723
		2	1.49000 *	0.42019	0.008	0.5210	2.4590
		4	1.30333 *	0.42019	0.015	0.3344	2.2723
	4	1	- 1.30000 *	0.42019	0.015	- 2.2690	- 0.3310
		2	0.18667	0.42019	0.669	- 0.7823	1.1556
		3	- 1.30333 *	0.42019	0.015	- 2.2723	- 0.3344

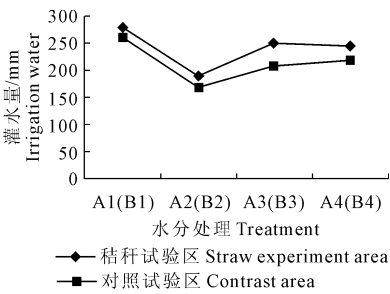


图 1 番茄开花坐果期阶段灌水量对比折线图

Fig.1 Contrast line of irrigation water for tomato in blossom fruit stage

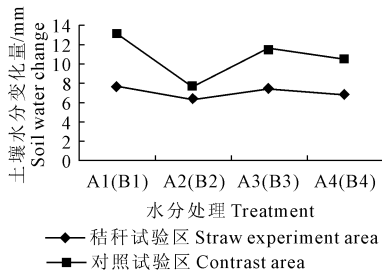


图 3 番茄开花坐果期土壤水变化量对比折线图

Fig.3 Contrast line soil water change for tomato in blossom fruit stage

2.1.2 对番茄结果期耗水的影响 秸秆试验区的阶段灌水量虽然大于对照试验区,但是其土壤水变化量却小于对照试验区,说明秸秆生物反应堆有利

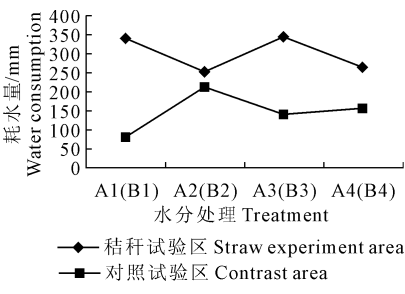


图 2 番茄开花坐果期阶段耗水量对比折线图

Fig.2 Contrast line of water consumption for tomato in blossom fruit stage

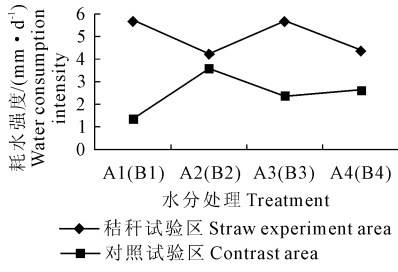


图 4 番茄开花坐果期阶段耗水强度对比折线图

Fig.4 Contrast line of water consumption intensity for tomato in blossom fruit stage

于保持和均衡土壤含水量(见表 6)。将番茄结果期的秸秆生物反应堆试验区和对照试验区耗水强度进行方差分析,得到在 5% 水平下不同水分处理间的

耗水强度存在显著差异(见表 7)。而且表现出处理 1 与处理 2、3、4 的耗水强度存在显著差异;处理 2 与处理 1 的耗水强度存在显著差异;处理 3 与处理 1 的耗水强度存在显著差异;处理 4 与处理 1 的耗水强度存在显著差异(见表 8)。

表 6 结果期(11-20~12-28)番茄耗水量表

Table 6 Water consumption intensity for tomato in fruit stage

处理 Treatment	灌水量 Amount of irrigation water /mm	耗水量 Amount of water consumption /mm	土壤水变化量 Variation of soil water /mm	耗水强度 Water consumption intensity /(mm·d ⁻¹)
A1	353	272.4	8.92	4.54
A2	345	393.6	9.38	6.56
A3	370	421.8	7.93	7.03
A4	326	377.4	8.89	6.29
B1	317	317.4	10.79	3.31
B2	312	175.8	13.71	3.26
B3	325	269.0	10.53	3.48
B4	289	152.0	14.40	3.20

综合方差分析结论,针对番茄结果期土壤水变化量、阶段耗水强度的实测数据绘制对比折线图(如图 5~图 8)。秸秆试验区结果期土壤水变化量并不明显,相反在对照区的土壤水变化量波动较大,变化较为明显。且秸秆试验区的土壤水变化量的波动规律与开花坐果期相似;阶段耗水量与阶段耗水强度方面,呈现出最大水分处理条件(A1)下耗水强度并非最大,而在 A3 水分处理条件下秸秆区和对照区均表现出耗水强度表现较大,且秸秆试验区较对照试验区耗水强度大很多,说明 A3 水分处理条件下,对番茄植株生长和秸秆生物反应堆的生物反应都能

起到积极的促进作用,表现出与开花坐果期相似的规律。之所以耗水强度较开花坐果期高,是因为结果期植株进行光合作用积累干物质更为活跃,果实膨大也需更多的水分供给。与此同时秸秆生物反应堆的生物反应也更为旺盛,需水量也随之增加。从耗水方面来看,相同水分处理条件下,A 处理耗水强度高于 B 处理,不同水分处理增幅由大到小依次是 3 (50. 50%) > 2 (50. 31%) > 4 (49. 13%) > 1 (27.10%)^[8]。

综合开花坐果期和结果期的方差分析和实测数据分析,说明本研究所设置的水分控制下限组合是合理的,且有很好的区分度。就植株生长和秸秆生物反应过程而言,A3(B3)水分处理是较优的水分控制下限组合。

2.2 对灌溉水利用效率的影响分析

水分利用效率指产量水平的水分利用效率,也就是灌溉单位体积水量所能收获农产品的数量。从表 9 中可以看出:A4 水分处理下的产量最高,相应的水分利用效率最高,在对照试验区 B2 水分利用效率最大,其产量略低于 B4 处理^[9]。

表 7 秸秆生物反应堆番茄结果期耗水强度方差分析表

Table 7 Variance analysis of water consumption intensity for tomato in fruit mature period with straw biologic reactor

组别 Comparison group	平方和 Sum of squares	df	均方 RMSE	F	显著性 Significant
组间 Between groups	10.594	3	3.531	4.582	0.038
组内 In the groups	6.166	8	0.771		
总数 Total numbers	16.760	11			

表 8 秸秆生物反应堆耗水强度多重比较表

Table 8 Multiple comparisons of water consumption intensity with straw biologic reactor

检验 Inspection	(I)处理 Treatment	(J)处理 Treatment	均值差 LMSE (I-J)	标准误 SE	显著性 Significant	95%置信区间 (95% confidence intervals)	
						下限 Lower limit	上限 Upper limit
LSD	1	2	-2.02000 *	0.71683	0.023	-3.6730	-0.3670
		3	-2.48333 *	0.71683	0.009	-4.1363	-0.8303
		4	-1.74333 *	0.71683	0.041	-3.3963	-0.0903
	2	1	2.02000 *	0.71683	0.023	0.3670	3.6730
		3	-0.46333	0.71683	0.536	-2.1163	1.1897
		4	0.27667	0.71683	0.710	-1.3763	1.9297
	3	1	2.48333 *	0.71683	0.009	0.8303	4.1363
		2	0.46333	0.71683	0.536	-1.1897	2.1163
		4	0.74000	0.71683	0.332	-0.9130	2.3930
	4	1	1.74333 *	0.71683	0.041	0.0903	3.3963
		2	-0.27667	0.71683	0.710	-1.9297	1.3763
		3	-0.74000	0.71683	0.332	-2.3930	0.9130

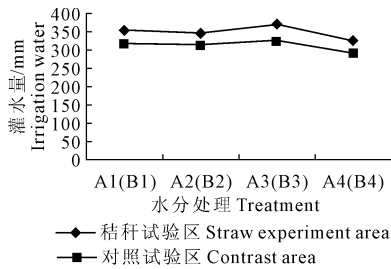


图 5 番茄结果期阶段灌水量对比折线图

Fig.5 Contrast line of irrigation water for tomato in fruit stage

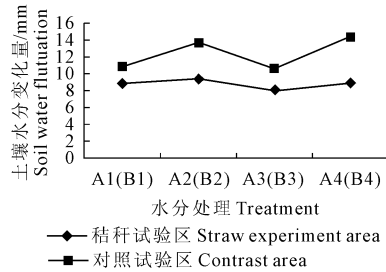


图 7 番茄结果期土壤水变化量对比折线图

Fig.7 Contrast line of soil water change for tomato in fruit stage

表 9 不同水分处理番茄产量、水分利用效率

Table 9 The tomoto yield and water use efficiency under different water treatments

处理 Treatment	产量 Yield /(g·hm ⁻²)	灌水量 Amount of irrigation water /(m ³ ·hm ⁻²)	水分利用效率 WUE /(kg·m ⁻³)
A1	201777	4337.47	46.52
A2	188313	3972.03	47.41
A3	201277	4175.43	48.20
A4	228933	4216.03	54.30
B1	129200	3915.83	32.99
B2	153700	3535.80	43.47
B3	132067	3723.60	35.47
B4	157867	3875.47	40.73

对秸秆生物反应堆条件下的产量进行单因素方差分析,表明在 5%水平下各处理间产量差异显著(见表 10 所示)。各处理间的多重比较表明:处理 A4 与处理 A1、A2、A3 产量差异显著(见表 11 所示)。说明水分对产量的影响是敏感的,设置适宜的灌溉

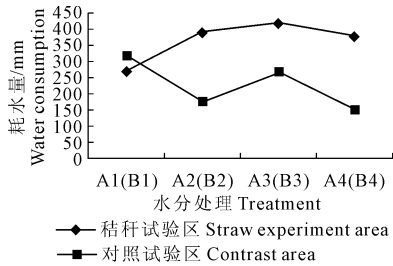


图 6 番茄结果期阶段耗水量对比折线图

Fig.6 Contrast line of water consumption for tomato in fruit stage

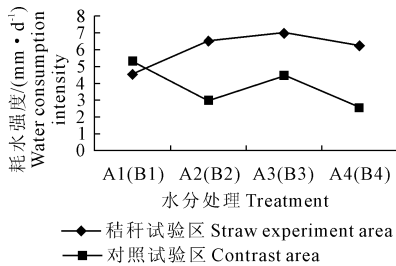


图 8 番茄结果期阶段耗水强度对比折线图

Fig.8 Contrast line of water consumption intensity for tomato in fruit stage

制度能够有效促进番茄提高产量^[10]。

通过对秸秆生物反应堆产量实测数据分析,绘制折产量对比折线图(如图 9~图 10),同时方差分析结果表明:从产量方面来看,相同水分处理条件下,A 处理产量高于 B 处理,不同水分处理增幅由大到小依次是 1(35.97%)>3(34.39%)>4(31.04%)>2(18.38%)。从水分利用效率方面来看,相同水分处理条件下,A 处理水分利用效率高于 B 处理,不同水分处理增幅由大到小依次是 1(29.08%)>3(26.41%)>4(24.99%)>2(8.31%)。秸秆生物反应堆条件下的番茄产量明显高于对照区番茄产量;水分利用效率亦表现出秸秆生物反应堆高于对照区的规律;折线图表明 A1(B1)处理与 A4(B4)处理在产量方面较其它处理好。在本研究所设置的水分控制下限组合条件下,总体呈现出从 A2(B2)处理到 A4(B4)水分供给越充分产量越高,但 A1(B1)水分处理虽然高于 A4(B4),但其产量却几乎没有提高。结合方差分析结论 A4(B4)处理较优。

表 10 秸秆生物反应堆试验区番茄产量方差分析表

Table 10 Variance analysis of tomato yield with experiment area of straw biological reactor

组别 Comparison group	平方和 Sum of squared	df	均方 Means of mean difference	F	显著性 Significant
组间 Between groups	2.626 × 10 ⁹	3	8.755 × 10 ⁸	6.066	0.019
组内 In the groups	1.155 × 10 ⁹	8	1.443 × 10 ⁸		
总数 Total numbers	3.781 × 10 ⁹	11			

表 11 秸秆生物反应堆试验区番茄产量多重比较表

Table 11 Multiple comparisons of tomato yield with straw biological reactor

检验 Inspection	(I)处理 Treatment	(J)处理 Treatment	均值差 LMSE (I - J)	标准误 SE	显著性 Significant	95%置信区间 (95% confidence intervals)	
						下限 Lower limit	上限 Upper limit
LSD	1	2	13463.33	9808.99	0.21	- 9156.25	36082.91
		3	500.00	9808.99	0.96	- 22119.58	23119.58
		4	- 27156.67	9808.99	0.02	- 49776.25	- 4537.09
	2	1	- 13463.33	9808.99	0.21	- 36082.91	9156.25
		3	- 12963.33	9808.99	0.22	- 35582.91	9656.25
		4	- 40620.00	9808.99	0.00	- 63239.58	- 18000.42
	3	1	- 500.00	9808.99	0.96	- 23119.58	22119.58
		2	12963.33	9808.99	0.22	- 9656.25	35582.91
		4	- 27656.67	9808.99	0.02	- 50276.25	- 5037.09
	4	1	27156.66667 *	9808.99	0.02	4537.09	49776.25
		2	40620.00000 *	9808.99	0.00	18000.42	63239.58
		3	27656.66667 *	9808.99	0.02	5037.09	50276.25

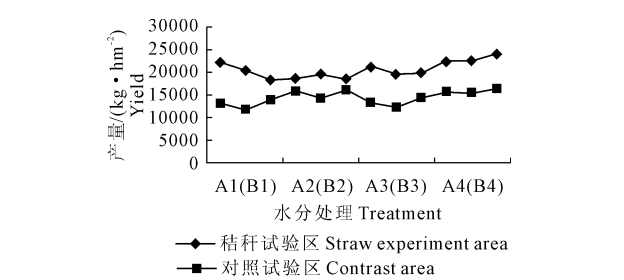


图 9 秸秆试验区与对照试验区产量对比折线图(重复值)

Fig.9 Contrast line of yield between straw experiment area with contrast area(duplicate)

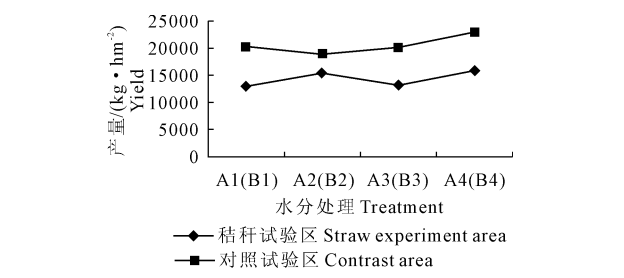


图 10 秸秆试验区与对照试验区产量对比折线图(处理均值)

Fig.10 Contrast line of yield between straw experiment area with contrast area(average)

针对秸秆生物反应堆试验区的水分利用效率方差分析表明:各处理间水分利用效率存在显著差异(见表 12 所示)。多重比较表明:处理 4 与处理 1、处理 2、处理 3 水分利用效率差异显著(见表 13 所示)。

针对水分利用效率绘制对比折线图(如图 11 ~ 图 12),表明秸秆试验区的水分利用效率明显高于对照区。总体上处理 4 较处理 1、处理 2、处理 3 水

分利用效率更高。综合考虑水分利用效率和产量分析的结论,就追求高产、高效生产目标而言,A4(B4)水分控制下限组合较优。

表 12 秸秆生物反应堆番茄水分利用效率方差分析表

Table 12 Variance analysis of water use efficiency for tomato with straw biological reactor

组别 Comparison group	平方和 Sum of squares	df	均方 RMSE	F	显著性 Significant
组间 Between groups	110.328	3	36.776	4.604	0.037
组内 In the groups	63.907	8	7.988		
总数 Total numbers	174.236	11			

3 秸秆生物反应堆条件下温室番茄适宜滴灌灌溉制度确定

主成分分析方法是一种多因素综合评价方法,运用多个指标对多个单位进行评价,其基本思想是将多个指标转化成为一个能够反映综合情况的指标来进行评价,是将多个因素通过变换以得到相对少的重要因素的一种多元统计分析方法。

依据能反映不同处理番茄生长情况的评价指标体系,本研究采用 SPSS 对其进行主成分分析。其基本步骤为整理评价指标原始数据、标准化数据、相关系数矩阵、方差分解主成分提取分析、初始因子载荷矩阵、计算得到主成分特征向量矩阵,见表 14 ~ 15。

表 13 秸秆生物反应堆番茄水分利用效率多重比较表

Table 13 Multiple comparisons of water use efficiency for tomato with straw biological reactor

检验 Inspection	(I)处理 Treatment	(J)处理 Treatment	均值差 LMSE (I - J)	标准误 SE	显著性 Significant	95% 置信区间 (95% confidence intervals)	
						下限 Lower limit	上限 Upper limit
LSD	1	2	- 0.98333	2.30773	0.681	- 6.3050	4.3383
		3	- 1.77667	2.30773	0.463	- 7.0983	3.5450
		4	- 7.77000 *	2.30773	0.010	- 13.0916	- 2.4484
	2	1	0.98333	2.30773	0.681	- 4.3383	6.3050
		3	- 0.79333	2.30773	0.740	- 6.1150	4.5283
		4	- 6.78667 *	2.30773	0.019	- 12.1083	- 1.4650
	3	1	1.77667	2.30773	0.463	- 3.5450	7.0983
		2	0.79333	2.30773	0.740	- 4.5283	6.1150
		4	- 5.99333 *	2.30773	0.032	- 11.3150	- 0.6717
	4	1	7.77000 *	2.30773	0.010	2.4484	13.0916
		2	6.78667 *	2.30773	0.019	1.4650	12.1083
		3	5.99333 *	2.30773	0.032	0.6717	11.3150

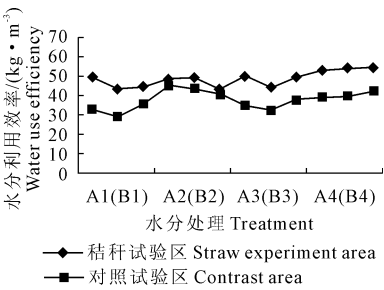


图 11 秸秆试验区与对照试验区水分利用效率对比折线图(重复值)

Fig. 11 Contrast line of WUE between straw experiment area with contrast area (duplicate)

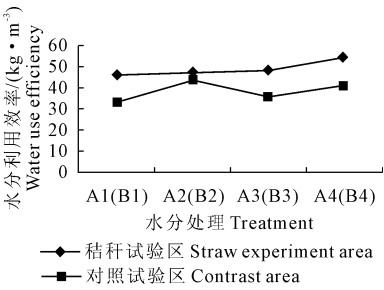


图 12 秸秆试验区与对照试验区水分利用效率对比折线图(处理均值)

Fig. 12 Contrast line of WUE between straw experiment area with contrast area (average)

经过计算得出按第一、第二主成分得分的排序结果见表 15 所示。将得到的特征向量与标准化后的数据相乘,可得第一、第二主成分表达式:

$$F_1^* = 0.712Z_{x1} + 0.65Z_{x2} - 0.266Z_{x3} \tag{5}$$

$$F_2^* = 0.237Z_{x1} + 0.4Z_{x2} + 0.916Z_{x3} \tag{6}$$

表 14 灌溉制度评价指标原始数据

Table 14 The original data of evaluating indexes for irrigation schedule

处理 Treatment	产量 X_1 Yield	水分利用效率 X_2 WUE	Vc 含量 X_3 Amount of Vc
A1	201777	46.20	0.12
A2	188313	47.51	0.12
A3	201277	48.30	0.09
A4	228933	54.29	0.07
B1	129200	33.04	0.05
B2	153700	43.57	0.06
B3	132067	35.45	0.08
B4	157867	40.76	0.07

表 15 各处理按第一、第二主成分得分的排序结果

Table 15 The ranking results of score according to the first, second principal components

处理 Treatment	第一主成分 F_1^* First principal component	排名 Rank	第二主成分 F_2^* Second principal component	排名 Rank
A1	- 0.315	4	1.312	3
A2	- 0.342	5	0.922	5
A3	- 0.368	6	0.664	6
A4	2.233	1	1.950	1
B1	- 1.166	7	0.295	7
B2	0.280	3	0.964	4
B3	1.347	2	1.535	2
B4	- 1.671	8	0.089	8

由于 F_1^* 中关于高产、节水的指标值的系数为正,而关于品质的指标值的系数为负,它反映了各水分处理下高产、节水指标和品质指标的对比, F_1^* 的值越大,表明该处理下的产量及水分利用率和品质

之间的差异越大;而 F_2^* 是 3 个标准化指标的加权和,因此,它反映了高产、节水、优质的水分处理组合, F_2^* 的值越大,表明该处理组合下的番茄产量较高、品质较好、节水效果较佳。主成分表达式 F_2^* 为本试验理想的综合评价公式。

通过对第二主成分 F_2^* 分析,由表 15 可知,水分处理 A4 和 B3 的得分相对较高,表明该处理下番茄产量、节水效率与品质较好。表明秸秆试验区番茄土壤含水量在苗期控制在 $60\% \theta_f \sim 70\% \theta_f$,开花坐果期控制在 $70\% \theta_f \sim 80\% \theta_f$,结果期控制在 $70\% \theta_f \sim 80\% \theta_f$ 且对照试验区番茄水分控制下限在苗期控制在 $60\% \theta_f \sim 70\% \theta_f$,开花坐果期控制在 $60\% \theta_f \sim 70\% \theta_f$,结果期控制在 $70\% \theta_f \sim 80\% \theta_f$ 的水分处理组合下的高产、优质、节水效果最好。因此,本研究确定的主成分表达式为:

$$F^* = 0.237Z_{x1} + 0.4Z_{x2} + 0.916Z_{x3} \quad (7)$$

结合前面的分析结果可知:在秸秆生物反应堆条件下作物 A4 水分处理对番茄植株的耗水强度不高,水分利用效率较高,但却提高了产量,并达到了节水、高效的最佳效果;因此,结合主成分分析结果和试验成果,得出 A4 水分处理为最佳水分控制下限处理组合。可得秸秆生物反应堆滴灌条件下番茄适宜的水分控制下限组合为苗期 $60\% \theta_f \sim 70\% \theta_f$,开花坐果期控制在 $70\% \theta_f \sim 80\% \theta_f$,结果期控制在 $70\% \theta_f \sim 80\% \theta_f$ 。

通过试验和理论分析得出的秸秆生物反应堆技术和滴灌条件下的适宜灌溉制度为:番茄全生育期(09-20-12-28)灌溉定额为:330~390 mm,灌水 17 次,耗水强度为 $2.2 \sim 2.7 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$;番茄苗期(09-20-10-16)灌水周期为 6 d,灌水 4 次,灌水定额为 15~18 mm,耗水强度为 $1.6 \sim 2.2 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$;番茄开花坐果期(10-17-11-19)灌水周期为 6 d,灌水 5 次,灌水定额为 22~26 mm,耗水强度为 $2.6 \sim 3.2 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$;番茄结果期(11-20-12-28)灌水周期为 5 d,灌水 8 次,灌水定额为 20~23 mm,耗水强度为 $2.3 \sim 2.8 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

4 结 论

在日光温室中以番茄为供试作物,以土壤水分作为灌水控制指标,研究秸秆生物反应堆和滴灌条件下番茄的耗水规律,主要得出以下结论:

(1) 秸秆试验区与对照试验区灌水量较小的情况下,秸秆生物反应堆表现出对保持和均衡土壤含水量有积极作用;灌水量较大的情况下,秸秆生物反

应堆较对照区植株耗水量大。与对照处理相比,秸秆生物反应堆明显增加了番茄开花坐果期和结果期的耗水强度,其增幅分别为 27.01%~50.50% 和 15.87%~76.32%。

(2) 秸秆试验区土壤水变化量并不明显,相反在对照区的土壤水变化量波动较大,变化较为明显。且秸秆试验区的土壤水变化量的波动规律与开花坐果期相似。

(3) A3 水分处理条件下:苗期 $60\% \theta_f \sim 70\% \theta_f$,开花坐果期控制在 $60\% \theta_f \sim 70\% \theta_f$,结果期控制在 $70\% \theta_f \sim 80\% \theta_f$,表现出水分对番茄植株生长和秸秆生物反应堆的生物反应都能起到更为积极的促进作用。

(4) 不同水分处理间的产量差异显著;秸秆生物反应堆条件下的番茄产量明显高于对照区番茄产量,其增幅为 18.38%~35.97%;水分利用效率亦表现出秸秆生物反应堆高于对照区的规律,其增幅为 8.31%~29.08%。

(5) 结合主成分分析结果和分析结论,得出 A4 (B4)水分处理为最佳水分控制下限处理组合。秸秆生物反应堆技术和滴灌条件下番茄适宜的水分控制下限组合为苗期 $60\% \theta_f \sim 70\% \theta_f$,开花坐果期控制在 $70\% \theta_f \sim 80\% \theta_f$,结果期控制在 $70\% \theta_f \sim 80\% \theta_f$ 。且番茄全生育期(09-20-12-28)灌溉定额为:330~390 mm,灌水 17 次,耗水强度为 $2.2 \sim 2.7 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

参 考 文 献:

- [1] 曹云娥,雍海燕,王佳,等.秸秆生物反应堆对宁夏引黄灌区设施连作土壤及蔬菜生长的影响[J].土壤与肥料,2013,(5):166-169.
- [2] 曹永新,兰永富.秸秆生物反应堆技术在日光温室中的应用[J].吉林农业,2010,(11):60.
- [3] 李波,王斌,王铁良,等.秸秆生物反应堆技术对温室秋冬茬番茄生长环境影响研究[J].灌溉排水学报,2011,30(5):95-98.
- [4] 马世林,王铁良,张玉龙,等.日光温室青椒滴灌最佳灌水下限组合试验研究[J].中国农村水利水电,2011,(2):62-68.
- [5] 崔艳秋,李玉珍.秸秆生物反应堆日光温室西葫芦试验研究[J].中国瓜菜,2010,(8):26-28.
- [6] 杨怀亮,郑向前,许世芬,等.秸秆生物反应堆技术在温室辣椒上的应用试验[J].长江蔬菜,2011,(21):51-52.
- [7] 王雅凤.秸秆生物反应堆技术在棚室蔬菜上的应用[J].农业科技通讯,2010,(7):220-222.
- [8] 郝永乐,邹志荣.早春温室黄瓜生产中秸秆生物反应堆应用效果的研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2009.
- [9] 李亮,张玉龙,孟庆龙,等.不同灌溉方法对日光温室番茄生长品质和产量的影响[J].北方园艺,2007,(2):75-78.
- [10] 郭敬华,石林琪,等.秸秆生物反应堆对日光温室黄瓜生育环境及产量的影响[J].河北农业科学,2009,13(5):17-19.