

不同灌水量及频率对番茄品质及糖分累积影响的研究

周海霞, 兰挚谦, 张凯歌, 郑文德, 马嘉伟, 林 薇, 张雪艳

(宁夏大学农学院, 宁夏 银川 750021)

摘 要:采用两因素随机区组试验设计, 设置 4 个灌水量(L1, L2, L3, L4)及 2 个灌水频率(P1, P2), 通过对冬春茬和夏秋茬番茄营养品质、糖组分、糖代谢酶及产量的研究, 以期探讨灌水量及频率对番茄品质形成机理的影响及综合品质产量最优的合理灌水量及频率。研究结果表明:适当减少灌水量可提高番茄各营养指标含量、糖组分含量、SS 和 SPS 活性以及 WUE, 但抑制 AI 和 NI 活性且降低了产量, 而灌水频率对各指标无显著影响;冬春茬可溶性酸、可溶性糖含量、糖酸比、SS 和 SPS 活性、果糖和葡萄糖含量均在 L2 处理达到了最大, 而产量以 L4 最大, 其中 Vc、葡萄糖、SS 活性等对其品质及产量形成影响较大;夏秋茬 L1 处理番茄营养品质指标、糖组分含量(淀粉除外)、SS 活性显著高于 L3、L4, 产量仍以 L4 最大, 果糖含量 L1 处理甚至显著高于 L3 与 L4 1.02 倍和 1.25 倍, 其中 Vc、蔗糖、NI 活性等对其品质及产量形成影响较显著;根据主成分综合品质及产量得出, 冬春茬与夏秋茬温室番茄苗期、开花坐果期、盛果期至拉秧分别灌水 150、200、400 ml · 株⁻¹ · d⁻¹与 300、600、900 ml · 株⁻¹ · d⁻¹, 每天灌水 1 次或者 2 次时品质及产量综合得分最佳。

关键词:番茄; 灌水量; 灌水频率; 品质和产量; 糖组分; 糖代谢酶活性

中图分类号:S641.2 **文献标志码:**A

Effects of different irrigation quantity and frequency on tomato quality and sugar accumulation

ZHOU Haixia, LAN Zhiqian, ZHANG Kaige, ZHENG Wende, MA Jiawei, LIN Wei, ZHANG Xueyan

(College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: A two-factor randomized block design with four irrigation levels (L1, L2, L3, L4) and two frequencies (P1, P2) in this study was used. By studying the nutritional quality such as sugar components, carbohydrate metabolizing enzymes, and yield of tomato in winter, spring, summer, and autumn, we discussed the effects of irrigation amount and frequency on the formation mechanism of tomato quality and the optimum irrigation amount and frequency for better quality and yield. The results showed that appropriate reduction in irrigation volume can increase the nutritional contents including sugar content, SS and SPS activities, and WUE, but inhibited the activity of AI and NI and reduced the yield, while the irrigation frequency had no significant effect on all indexes. The organic acids, soluble sugar content, sugar and acid ratio, SS and SPS activities, fructose and glucose contents of winter and spring crop reached the maximum in L2 treatment, while the yield was the largest in L4, of which Vc, glucose, and SS activity had a greater impact on its quality and yield formation. Nutritional quality indicators of summer and autumn stubble tomato, sugar content (except starch), SS activity with L1 treatment were significantly higher than L3 and L4. The yield was still the largest with L4. The fructose content in L1 was significantly higher than that with L3 and L4, 1.02 and 1.25 times, respectively. Among them, Vc, sucrose, and NI activity had significant effects on its quality and yield formation. According to analyses of the main components of the overall quality and yield, it was determined that for winter and spring crops, winter and spring crops should be irrigated with 150, 200, and 400 ml · plant⁻¹ · d⁻¹ and 300, 600, and 900 ml · plant⁻¹ · d⁻¹, respectively, once or twice a day. The overall quality and yield scores were the best.

ty and yield derived, winter and spring stubble in greenhouse, greenhouse tomato seedling stage, flowering set fruit stage, and full bearing period to seedlings pulling were irrigated at 150, 200, 400 ml · plant⁻¹ · d⁻¹ and 300, 600, 900 ml · plant⁻¹ · d⁻¹, and 1 or 2 times a day obtained the best overall quality and yield.

Keywords: tomato; irrigation quantity and frequency; quality and yield; sugar component; activity of sugar metabolizing enzymes

我国设施农业发展速度较快,面积居世界首位,蔬菜产品已基本满足了消费要求,蔬菜生产模式已由追求产量型向质量型转变。番茄是我国西北地区日光温室栽培的主要特色经济蔬菜,水分是限制番茄生产高产优质的首要因子,合理番茄灌溉调度是提高番茄产量和品质的关键^[1]。

前人关于番茄灌溉的研究主要侧重于亏缺灌溉对番茄品质和风味物质组成的影响。亏缺灌溉后植株在生长生理、光合产物代谢和分配上都会发生一系列变化来适应水分胁迫,适度水分亏缺能刺激作物根系生长,增加根系土壤分布层,加大对土壤水分、养分的吸收,促进作物地上部分生长,改善植株叶片特性^[2-3],但过度水分亏缺可抑制番茄的生长发育,株高、茎粗等随着土壤水分下限的增大而减少,且会显著降低单果重、产量及经济效益^[4-8]。水分不仅影响植株生长、物质积累和产量形成,也是影响番茄形成品质的主要可控因素之一^[9-11]。土壤含水量降低可使植物体内的纤维素发达、果品组织硬化、苦味产生,从而影响品质;土壤含水量过多时糖、盐的相对浓度降低,风味因此变淡。亏缺灌溉后果实糖含量、有机酸含量、Vc 含量及干物质积累量 and 水分利用效率都增加^[12-15];灌水频率影响土壤湿度变化,对番茄生长发育也有显著影响,当灌水间隔为 2~3 d 时,番茄的糖酸比随灌水量的减少而上升,灌水间隔为 4 d 时,番茄的糖酸比和 Vc 含量等品质指标随灌水量的减少而降低^[16]。果实积累的糖分为果糖、葡萄糖和蔗糖,是果实品质成分和风味物质如维生素、色素和芳香物质等合成的基础原料,也是植物生命活动包括果实生长发育所需的基础物质^[17],其中蔗糖在植株叶片细胞的细胞质内通过磷酸丙糖合成后通过韧皮部转运进入到果实中,随后又被 SPS(蔗糖磷酸合成酶)和 SS(蔗糖合成酶)重新合成。水分亏缺提高了果实中 SPS 和 SS 的活性,降低了果实成熟期 AI(酸性转化酶)和 NI(中性化酶)的活性,促进了蔗糖水解为葡萄糖和果糖,进而引起了淀粉水解速度的加快,导致果实中可溶性糖的含量增加^[19],番茄品质风味提升。

因此,合理灌溉可以有效改善果实品质与产量,提高经济效益,同时,还可以解决水资源浪费等问题,但是系统围绕灌水量和灌水频率对设施番茄品质产量、糖组分和糖代谢酶及糖分累积机理的研究鲜有报道,为此,本文以前人研究为基础,结合节水和增质两方面,系统研究秋冬茬、冬春茬番茄不同灌水量和灌水频率对其品质产量、糖组分、糖相关代谢酶活性及糖分累积的影响,以期对日光温室番茄栽培的合理灌溉提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料设计

本试验研究于 2015 年 12 月至 2016 年 11 月在宁夏贺兰园艺产业园 4 号日光温室中进行,2015—2016 年冬春茬和 2016 年夏秋茬试验处理设置一致,所用番茄品种为粉太郎 1,所用土壤为沙壤土。试验设置灌水量 L 和灌溉频率 P 两个因素,其中灌水量设置 4 个水平:L1、L2、L3、L4,灌溉频率设置 2 个水平:P1、P2,共 8 个处理:L1P1、L1P2、L2P1、L2P2、L3P1、L3P2、L4P1、L4P2。每个灌水量水平按三个生育期设置 3 个水量,灌水由时间控制器控制电源开关自动滴灌,每个处理总灌水量由水表记录。定植密度株距 40 cm,行距 80 cm,每个处理 3 次重复,小区面积为 1.4 m×6.13 m=8.582 m²,区组随机排列,两个小区间用苯板隔离,田间栽培管理一致。两茬试验灌水量和灌水频率处理设置如表 1。

1.2 测定指标及方法

果实品质测定:取番茄第三穗果进行品质测定,每个处理的每个重复随机取 4 个果实共 12 个果实并保存于-20℃冰箱,以备常规品质及酶活性测定。Vc 含量采用钼蓝比色法测定;有机酸含量采用碱(NaOH)滴定法测定;可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定;可溶性固形物含量采用 TD-45 数字折光仪测定;硝酸盐含量采用硫酸-水杨酸法测定;蔗糖含量和果糖含量采用间苯二酚光度法测定;葡萄糖含量采用葡萄糖氧化酶-辣根过氧化物酶-邻联茴香胺偶联反应分光光度法测定;淀粉含量采用高氯酸

表 1 试验处理设置/(ml · 株⁻¹ · 天⁻¹)
Table 1 The experimental design/(ml · plant⁻¹ · d⁻¹)

茬口 Stubble	处理 Treatment	缓苗后至盛花期 Late seedling~ Full flowering stage		盛花期至盛果期 Flowering~ Fruiting stage		盛果期至采收 Full fruits~ Harvest	
		2016-01-01~02-15		02-16~04-14		04-15~05-31	
		早上(10 : 00) Morning	下午(15 : 00) Afternoon	早上(10 : 00) Morning	下午(15 : 00) Afternoon	早上(10 : 00) Morning	下午(15 : 00) Afternoon
2015—2016 年 冬春茬 Winter-spring crop	L1P1	100	—	150	—	350	—
	L1P2	50	50	75	75	175	175
	L2P1	150	—	200	—	400	—
	L2P2	75	75	100	100	200	200
	L3P1	200	—	250	—	450	—
	L3P2	100	100	125	125	225	225
	L4P1	250	—	300	—	500	—
	L4P2	125	125	150	150	250	250

茬口 Stubble	处理 Treatment	缓苗后至盛花期 Late seedling~ Full flowering stage		盛花期至盛果期 Flowering~ Fruiting stage		盛果期至采收 Full fruits~ Harvest	
		2016-06-21~07-29		07-30~09-22		09-23~10-31	
		早上(07 : 00) Morning	下午(18 : 00) Afternoon	早上(07 : 00) Morning	下午(18 : 00) Afternoon	早上(06 : 00) Morning	下午(19 : 00) Afternoon
2016 年夏秋茬 Summer-autumn crop	L1P1	300	—	600	—	900	—
	L1P2	150	150	300	300	450	450
	L2P1	350	—	650	—	950	—
	L2P2	175	175	325	325	425	425
	L3P1	400	—	700	—	1000	—
	L3P2	200	200	350	350	500	500
	L4P1	450	—	750	—	1050	—
	L4P2	225	225	375	375	525	525

水解-蒽酮比色法测定;蔗糖磷酸合成酶(SPS)活性和蔗糖合成酶(SS)活性采用分光光度法测定;酸性转化酶(AI)活性和中性转化酶(NI)活性采用 3,5-二硝基水杨酸法测定。

产量测定:每穗果成熟后测量产量进行累加,最终分别统计各处理整个生育期的总产量,并且按照 666.7 m²番茄种植的株数折合产量;每个处理每个重复随机取 4 个果实共 12 果实于烘箱 105℃ 杀青 0.5 h 后降至 65℃ 烘干测定果实干重,并根据 666.7 m² 的株数和单株果数折算干果实产量。

1.3 数据统计处理

数据分析采用 Microsoft Excel 2007 软件和 SPSS 17.0 软件进行处理和主成分分析,采用 LSD 方法在 P<0.05 水平进行二因素显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同灌水量及频率对番茄营养品质的影响

表 2 结果显示,在一定灌水量范围内适当降低灌水量可提高番茄果实可溶性固形物、Vc 含量、糖酸比等,从而提高了番茄品质和风味,相反,灌水量较多时会造成番茄品质下降,而灌水频率对番茄果实品质无显著影响。冬春茬果实可溶性酸、可溶性

糖含量和糖酸比均在灌水量为 L2 时达最大值,L1 处理 Vc 含量和硝酸盐含量分别比 L4 处理高 27.50%、1.34%;夏秋茬番茄可溶性酸、可溶性糖含量和糖酸比的平均值 L1 处理分别显著高于 L4 处理 41.86%、34.45%和 49.60%,Vc 含量 L1P1 处理分别比 L3P1、L4P1 显著高 12.68%、21.57%,硝酸盐含量在 L1 处理分别显著高于 L2 处理、L3 处理和 L4 处理 57.50%、75%和 103%。

2.2 不同灌水量及频率对番茄产量及水分利用效率的影响

水分利用效率(WUE)指植物消耗单位水量所产出的同化量,反映植物生产过程中的能量转化效率,也是评价一定水分条件下植物生长适宜度的综合指标之一,WUE=总产量/总灌水量。由表 3 可以得出,随灌水量增加产量增加,会造成水分利用效率 WUE 下降,而灌水频率对产量和 WUE 的影响没有达到显著性。两茬番茄的 WUE 均在 L1 与 L3、L4 间差异显著,其中冬春茬 L1 的 WUE 分别显著高于 L3、L4 处理 39.21%、64.52%;冬春茬番茄产量在 L4 与 L3 处理下分别显著高出 L1 处理 30.94%与 24.47%,夏秋茬产量在 L4、L3 处理下分别显著大于 L1 处理 21.63%、18.89%。

表 2 各灌水处理下番茄营养品质指标统计表

Table 2 The statistics of nutritional quality index of tomato under different irrigation treatments

茬口 Stubble	处理 Treatment	Vc /(mg·100g ⁻¹)	硝酸盐 Nitrate /(mg·100g ⁻¹)	可溶性固形物 Soluble solids/%	可溶性酸 Organic acid/%	可溶性糖 Soluble sugar/%	糖酸比 Sugar-acid ratio
冬春茬 Winter-spring crop	L1P1	61.75±0.03ab	1.38±0.018a	8.20±0.07a	0.79±0.04abc	6.29±0.5c	8.07±0.58abc
	L1P2	64.07±0.04a	1.32±0.015ab	8.10±0.27ab	0.81±0.05ab	6.75±0.69abc	7.89±0.63abc
	L2P1	56.76±0.02abc	1.23±0.007abc	7.96±0.17abc	0.85±0.05ab	8.10±0.36ab	9.57±0.39a
	L2P2	56.70±0.05abc	1.25±0.008abc	7.62±0.36bcd	0.87±0.08a	8.16±0.52a	9.28±0.72ab
	L3P1	53.92±0.02bcd	1.03±0.009bc	7.26±0.07d	0.77±0.06abc	7.27±0.45abc	8.48±0.8abc
	L3P2	52.94±0.02cd	0.99±0.01c	7.47±0.32cd	0.72±0.06bcd	7.02±0.51abc	8.64±0.49abc
	L4P1	48.43±0.01d	0.59±0.007d	6.28±0.04e	0.65±0.02cd	6.51±0.79bc	7.43±0.34c
	L4P2	49.33±0.02cd	0.51±0.007d	6.24±0.04e	0.62±0.02d	6.34±0.58c	7.48±0.82bc
夏秋茬 Summer-autumn crop	L1P1	62.60±0.07a	1.89±0.037a	5.96±0.22a	0.61±0.084a	7.61±0.43a	13.24±1.91a
	L1P2	61.38±0.04ab	1.79±0.037ab	5.68±0.24ab	0.59±0.019a	7.50±0.46a	12.67±0.77ab
	L2P1	57.34±0.02ab	1.20±0.005bc	5.13±0.37bc	0.51±0.045abc	6.99±0.26ab	10.85±0.91abc
	L2P2	56.42±0.04ab	1.22±0.009bc	5.00±0.11bc	0.54±0.038ab	6.86±0.07ab	10.42±0.66bc
	L3P1	49.69±0.03b	1.08±0.008c	4.70±0.2cd	0.49±0.042abc	6.44±0.15ab	10.18±0.81bc
	L3P2	50.26±0.05ab	1.04±0.009c	4.78±0.26cd	0.48±0.028abc	6.39±0.24ab	10.02±0.66bc
	L4P1	48.92±0.05b	0.93±0.012c	4.10±0.35de	0.43±0.03bc	5.66±0.52b	8.85±0.23c
	L4P2	48.63±0.03b	0.93±0.012c	3.93±0.32e	0.41±0.054c	5.70±1.01b	8.63±0.69c

注:表中同列不同小写字母表示处理间差异达到 5% 显著水平。下同。

Note: Different lowercase letters within each column indicate that the difference between treatments significant differences at 0.05 level. The same below.

表 3 各处理产量及水分利用效率统计比较

Table 3 The comparison statistical of yield and water use efficiency of tomato under different treatments

处理 Treatment	产量/(kg·666.7m ⁻²) Yield		灌水总量/m ³ Total amount of irrigation		水分利用效率 WUE /(kg·m ⁻³)	
	冬春茬 Winter-spring crop	夏秋茬 Summer-autumn crop	冬春茬 Winter-spring crop	夏秋茬 Summer-autumn crop	冬春茬 Winter-spring crop	夏秋茬 Summer-autumn crop
L1P1	5187.36±369.37c	3720.69±193.76d	72.22	175.71	71.83±5.11a	21.18±1.1a
L1P2	5272.08±317.98bc	3838.75±233.33cd	72.22	175.71	72.99±4.4a	21.85±1.32a
L2P1	5945.83±317.98abc	4079.17±264.58bcd	95.73	222.61	62.11±3.32b	18.32±1.19ab
L2P2	5812.72±214.58abc	4196.06±179.47abcd	95.73	222.61	60.72±2.24bc	18.85±0.81ab
L3P1	6456.87±296.27a	4423.54±305.51ab	125.13	249.99	51.60±2.37bcd	17.69±1.22b
L3P2	6394.79±688.8ab	4328.13±88.19abc	125.13	249.99	51.11±5.5cd	17.31±0.35b
L4P1	6792.22±491.03a	4525.55±264.58ab	155.58	284.57	43.66±3.16d	15.90±0.93b
L4P2	6917.69±59.7a	4651.02±332.78a	155.58	284.57	44.46±0.38d	16.34±1.17b

2.3 不同灌水量及频率对番茄糖分组成及糖代谢酶活性的影响

表 4 结果表明,在一定的灌水量范围内(除冬春茬 L1 处理外),番茄果糖、蔗糖和葡萄糖含量以及 SS、SPS 活性随灌水量增加呈下降的变化趋势,淀粉含量与 AI、NI 活性的变化相反,而灌水频率对它们均无显著影响。冬春茬番茄果糖和葡萄糖含量及 SS 和 SPS 活性均在 L2 处理下最大,L2 处理的果糖含量分别比 L1、L3 和 L4 处理显著高出 0.609 倍、1.74 倍和 3.1 倍,葡萄糖含量、SS 活性在 L2 处理下分别显著高于 L4 处理 80.55%、73.53%,蔗糖在 L1 处理下显著高于 L4 处理 40.65%,L4 的 NI 活性显著高于其他处理,AI 在灌水量为 L2 水平时活性最低;夏秋茬番茄果糖含量在 L1 处理显著高于 L3 和 L4 1.02 倍、1.25 倍,葡萄糖含量在 L1P1 处理下

显著高于 L4 处理 48.93%,蔗糖 L1 处理显著高出 L4 处理 38.97%,SS 活性在 L1 处理分别显著高出 L3 处理、L4 处理 64.75%、83.61%,L1 处理的 SPS 活性分别显著高于 L3 处理及 L4 处理 67.54% 及 97.51%,L3、L4 处理的 AI 活性分别显著高于 L1 处理 62.89%、66.99%。

2.4 不同灌水量及频率对番茄品质产量及糖组分、糖代谢酶的主成分分析

对各灌水处理品质、产量和水分利用效率、糖组分、糖代谢酶活性指标进行主成分分析,由表 5 可以看出,冬春茬主成分 1 特征值为 11.633,贡献率为 72.71%,主成分 2 特征值为 3.72,贡献率为 23.25%,前两个主成分累积贡献率达 95.96%;夏秋茬主成分 1 特征值为 15.365,贡献率为 96.03%。通过主成分分析表 6 的初始因子载荷,将初始因子载荷矩阵中

表 4 各处理番茄糖分组成及糖代谢酶活性统计比较

Table 4 The comparison statistical of sugar content and sugar metabolizing enzymes of tomato under different treatments

茬口 Stubble	处理 Treatment	糖组分含量 Sugar content/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)				糖代谢酶活性 Sugar metabolizing enzymes/($\mu\text{mol} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$)				
		果糖 Fructose	蔗糖 Sucrose	葡萄糖 Glucose	淀粉 Starch	蔗糖合成酶 Sucrose synthase	蔗糖磷酸合成酶 Sucrose phosphate synthase	酸性转化酶 Acid invertase	中性转化酶 Neutral invertase	
冬春茬 W ^{inter} -spring crop	L1P1	53.30±12.44b	581.28±33.39a	270.33±30.82bc	15645.12±198.76a	72.91±10.10abc	35.89±4.12b	40.05±2.11ab	40.28±0.75b	
	L1P2	52.50±6.45b	588.94±36.51a	276.06±53.26bc	15176.25±274.52a	67.42±4.83bcd	36.80±10.18b	36.76±2.57abc	48.97±4.27b	
	L2P1	85.76±16.62a	538.92±45.99ab	387.23±25.11a	17030.53±491.05	87.90±9.42ab	65.93±9.19a	30.42±4.53bc	31.85±11.6b	
	L2P2	83.61±18.77a	524.66±47.49ab	375.07±38.23ab	17288.75±475.07	91.19±15.24a	56.81±10.51ab	28.78±2.15c	35.38±7.58b	
	L3P1	31.29±3.16bc	461.00±26.59bc	300.367±45.6abc	22655.21±807.59	69.59±6.72abcd	43.64±4.02b	35.75±5.59abc	44.05±4.12b	
	L3P2	27.05±2.89bc	443.98±23.56bc	288.55±43.34abc	23703.33±401.82	66.48±5.59cd	45.58±3.13ab	36.14±3.98abc	51.71±4.5ab	
	L4P1	22.62±1.42c	413.28±26.01c	214.47±24.24c	27415.02±576.14	50.65±5.25d	39.87±2.36b	44.64±3.77a	67.03±4.07a	
	L4P2	20.92±2.26c	406.61±23.88c	196.31±21.92	25580.16±364.18	54.66±4.42cd	41.02±5.13b	43.16±1.82a	68.76±2.21a	
夏秋茬 Summer-autumn crop	L1P1	38.12±3.41a	558.07±77.13a	476.25±28.89a	34947.31±2679.25ab	69.789±6.89a	42.83±4.37a	10.24±0.93d	59.78±2.16d	
	L1P2	32.28±3.69ab	550.02±64.71ab	469.83±63.62ab	34428.81±3573.91b	70.11±2.98a	42.55±3.54ab	11.37±0.51cd	57.71±3.95d	
	L2P1	25.39±1.19bc	492.86±25.25abc	439.91±58.82ab	37974.27±3036.59ab	60.88±9.26ab	32.85±4.68bc	13.98±1.22bcd	64.63±1.6cd	
	L2P2	24.53±2.66c	483.05±22.63abc	429.81±21.62ab	38263.12±4861.87ab	55.58±5.34abc	30.96±2.14cd	14.35±0.96abc	66.72±3.3cd	
	L3P1	18.86±1.59cd	430.41±30.76abc	356.67±18.42bc	42800.75±3761.05ab	42.35±7.23bc	25.57±1.52cd	16.68±0.75ab	71.35±1.56bc	
	L3P2	21.35±2.04cd	419.82±54.14bc	360.34±27.86bc	43418.75±8694.44ab	43.93±5.19bc	26.03±2.92cd	15.01±2.54abc	73.27±2.9bc	
	L4P1	16.95±1.11d	401.59±19.69c	319.79±24.89c	45702.31±3487.07ab	38.01±9.26c	21.69±1.84d	18.06±1.22a	83.84±5.92a	
	L4P2	16.83±2.51d	404.31±36.24c	307.56±36.61c	46205.53±2553.99a	41.85±6.69bc	22.38±0.78d	17.09±1.13ab	80.25±3.2ab	

表 5 各处理特征值和累积贡献率

Table 5 Eigenvalues and cumulative contribution proportions of different treatments

主成分 Principle components	冬春茬 Winter-spring crop			夏秋茬 Summer-autumn crop		
	特征值 Eigenvalues	贡献率/% Proportion	累积贡献率/% Cumulative proportion	特征值 Eigenvalues	贡献率/% Proportion	累积贡献率/% Cumulative proportion
1	11.633	72.708	72.708	15.365	96.033	96.033
2	3.72	23.248	95.957	0.255	1.591	97.624
3	0.326	2.039	97.995	0.176	1.102	98.726
4	0.143	0.897	98.892	0.106	0.66	99.386
5	0.09	0.565	99.457	0.059	0.368	99.754
6	0.051	0.32	99.777	0.028	0.176	99.93
7	0.036	0.223	100	0.011	0.07	100
8	0	0	100	0	0	100
9	0	0	100	0	0	100
10	0	0	100	0	0	100
11	0	0	100	0	0	100
12	0	0	100	0	0	100
13	0	0	100	0	0	100
14	0	0	100	0	0	100
15	0	0	100	0	0	100
16	0	0	100	0	0	100

表 6 初始因子载荷矩阵

Table 6 Component load matrix

指标 Attributes	冬春茬 Winter-spring crop		夏秋茬 Summer-autumn crop
	Prin 1	Prin 2	Prin 1
Vc	0.778	-0.611	0.981
硝酸盐 Nitrate	0.934	-0.313	0.961
可溶性固形物 Soluble solids	0.903	-0.345	0.983
酸 Organic acid	0.985	0.043	0.978
可溶性糖 Soluble sugar	0.684	0.707	0.986
糖酸比 Sugar-acid ratio	0.794	0.577	0.983
产量 Yield of fruit	-0.798	0.594	-0.989
水分利用效率 WUE	-0.797	0.596	0.976
果糖 Fructose	0.914	0.193	0.975
蔗糖 Sucrose	0.85	-0.506	0.992
葡萄糖 Glucose	0.888	0.449	0.976
淀粉 Glucose	-0.91	0.375	-0.984
SS 活性 SPS activity	0.933	0.314	0.977
SPS 活性 SS activity	0.545	0.792	0.993
AI 活性 AI activity	-0.858	-0.455	-0.98
NI 活性 NI Activity	-0.959	-0.131	-0.966

的数据输入到数据编辑窗口(为变量冬春茬 B1、B2,夏秋茬 B1),再利用公式“冬春茬 $A1=B1/\text{SQR}(11.633)$ 、 $A2=B2/\text{SQR}(3.72)$ 、夏秋茬 $A1=B1/\text{SQR}(15.365)$ ”即可得到特征向量“冬春茬 A1、A2”、“夏秋茬 A1”(表 7)。

表 7 统计了表 6 中特征值对应的特征向量,即主成分与原变量的关系密切程度,特征向量的绝对值越大则关系越密切。冬春茬第一主成分与 Vc、硝

表 7 相关矩阵的特征向量

Table 7 Eigenvectors of correlation matrix

指标 Attributes	冬春夏 Winter-spring crop		夏秋茬 Summer-autumn crop
	Prin 1	Prin 2	Prin 1
Vc	0.2345	-0.2455	0.3357
硝酸盐 Nitrate	0.2756	-0.1071	0.1315
可溶性固形物 Soluble solids	0.2633	-0.1237	0.1663
酸 Organic acid	0.2774	0.0951	0.2955
可溶性糖 Soluble sugar	0.1389	0.3716	0.1870
糖酸比 Sugar-acid ratio	0.1801	0.3273	0.1365
产量 Yield of fruit	0.2364	-0.2441	0.3077
水分利用效率 WUE	-0.2448	0.2289	-0.3353
果糖 Fructose	0.2511	0.1457	0.1044
蔗糖 Sucrose	0.2549	-0.1957	0.2984
葡萄糖 Glucose	0.2142	0.2910	0.3344
淀粉 Glucose	-0.2770	0.1212	-0.1765
SPS 活性 SPS activity	0.1211	0.3748	0.1490
SS 活性 SS activity	0.2486	0.2106	0.3047
AI 活性 AI activity	-0.2110	-0.2747	-0.3156
NI 活性 NI activity	-0.2612	-0.1379	-0.2023

酸盐、可溶性固形物、有机酸、4 个糖组分、SS 活性、AI 活性、NI 活性、产量及 WUE 关系密切,第二主成分与 Vc、可溶性糖、糖酸比、葡萄糖、SPS 活性、SS 活性、AI 活性、产量及 WUE 关系密切;夏秋茬番茄第一主成分与 Vc、有机酸、蔗糖、葡萄糖、SS 活性、NI 活性、产量及 WUE 关系密切。

综上所述,冬春茬番茄 Vc、葡萄糖、SS 活性、AI 活性、产量及 WUE 对其品质及产量形成影响与贡

献较大;夏秋茬番茄 Vc、有机酸、蔗糖、葡萄糖、SS 活性、NI 活性、产量及 WUE 对其品质及产量形成影响与贡献较显著。

2.5 综合评价

由特征向量得出由标准化变量所表达的各主成分的关系式,由于冬春茬前 2 个主成分已反映了全部信息的 95.96%,夏秋茬前 1 个主成分反映了全部信息的 96.03%,所以冬春茬可以由前 2 个主成分的贡献率为权数求加权均值得主成分综合得分 E1,夏秋茬由前 1 个主成分的贡献率为权数求加权均值得主成分综合得分 E2。这个综合得分可以综合评价不同灌水量和灌水频率对番茄品质形成及产量的影响,某个处理综合得分越高则表明这个处理品质与产量综合评价最优。

E1= 0.7271 Prin1+0.2325 Prin2

E2= 0.9603 Prin1

各处理主成分综合得分及综合排序如表 8 所示。就灌水量处理而言,冬春茬各灌水量下综合得分为 L2>L3>L1>L4,夏秋茬为 L1>L2>L3>L4,其中冬春茬 L2P1 处理综合得分最高,夏秋茬 L1P1 处理最高,即两个处理下的果实品质和产量综合性最优。

表 8 番茄各灌水处理品质及产量的综合评分和综合排序
Table 8 The comprehensive scores and comprehensive ranks of quality and yield of tomato under different irrigation treatments

处理 Treatment	冬春茬 Winter-spring crop		夏秋茬 Summer-autumn crop	
	综合排序 Comprehensive rank	综合得分 Comprehensive score	综合得分 Comprehensive score	综合排序 Comprehensive rank
L1P1	650.21	6	729.28	1
L1P2	663.11	5	726.26	2
L2P1	739.32	1	698.51	3
L2P2	722.68	2	681.48	4
L3P1	688.46	4	639.40	6
L3P2	709.86	3	651.97	5
L4P1	600.86	8	510.85	8
L4P2	611.88	7	617.91	7

3 讨 论

水分亏缺虽提高了番茄果实品质却不同程度降低了产量,二者是一对相互矛盾的共存体,产量直接影响经济效益,而作为影响作物生长的五大环境因子之一的水分,对产量的形成更是起着至关重要的作用。本试验研究结果显示,增加灌水量可以提高产量,但会导致水分利用效率降低,而灌水频率对产量及水分利用效率无显著影响,适当减少灌水量可以提高水分生产效率,起到节水的效果。有

研究与本研究得出了一致的结果^[20-21],快速膨大期低灌水处理均对产量有不利影响^[22-23],开花期水分亏缺提高了水分利用效率。

基于库源同化物竞争理论的品质调控一直都是研究热点,而品质的形成过程是一个复杂的过程,本研究通过主成分分析得出,Vc、有机酸、蔗糖、葡萄糖、SS 活性、AI 活性、NI 活性、产量及 WUE 等指标对番茄品质及产量形成影响与贡献较大,且各品质指标对水分的敏感程度及响应过程不尽相同。番茄成熟期水分、肥料对番茄品质的影响很大^[24-26]。本试验通过研究发现,适当减少灌水量可以提高番茄果实可溶性糖含量、Vc 含量、糖酸比等营养品质,从而提高了番茄品质和风味,相反,灌水量较多时,会造成番茄品质下降,这一方面是因为水分对番茄果实中营养物质有稀释作用,可溶性固形物、可溶性糖等物质会因灌水量的增加而被稀释减少,另一方面是由于水分的增加降低了促进蔗糖合成的酶活性而造成蔗糖含量下降,从而降低番茄果实风味品质,这与关于节水调质方面的研究结果相符^[27]。糖分累积是番茄果实品质形成的关键因素,番茄果实的糖分主要由葡萄糖、果糖和蔗糖组成,蔗糖通过韧皮部转运进入到果实中之后,会在蔗糖代谢相关酶的作用下分解成葡萄糖和果糖^[28],蔗糖代谢酶有四种,SS 和 SPS 活性之和为合成活性,AI 和 NI 活性之和为分解活性,推测番茄果实中糖分的累积是由合成活性和分解活性之和,即净活性决定的^[29]。本研究发现,在一定灌水量范围内,促进蔗糖合成酶 SS、SPS 活性随着灌水量的增加呈下降的变化,而催化蔗糖分解的酶 AI、NI 的活性随着灌水量的增加逐渐增强,但当灌水量低于适宜范围时,同样会造成 SS、SPS 活性下降和 AI、NI 活性的增强,所以当灌水量减少时因 SS、SPS 活性升高而加速了蔗糖的合成,AI 和 NI 活性下降而减缓了蔗糖分解成果糖和葡萄糖,而果糖的甜度是蔗糖的 1.8 倍,灌水量增加抑制了蔗糖水解成果糖,所以造成番茄整体甜度的下降,从而使品质变劣。崔秀敏等^[30]研究发现,水分亏缺降低了果实成熟期 AI 和 NI 的活性,与本研究的结果相符。本文通过对各灌水处理品质、产量和水分利用效率、糖组分、糖代谢酶活性指标进行主成分分析,解释各处理产生差异的主成分贡献的冬春茬主要有 2 个主成分,主成分 1 贡献率为 72.71%,主成分 2 贡献率为 23.25%,这两个主成分可以解释差异产生的 95.96%;夏秋茬主要有 1 个主成分,其贡献率为 96.03%。结果表明冬春茬 L2P1 处理综合得分最高,夏秋茬 L1P1 处理综

合得分最高。

4 结 论

1)增加灌水量可提高产量,但会造成 WUE 下降,适当减少灌水量可以提高番茄可溶性糖含量、Vc 含量等,从而提高了番茄品质和风味,而灌水频率对产量及各品质指标无显著影响;冬春茬有机酸、可溶性糖含量和糖酸比均在灌水量水平为 L2 时最大,夏秋茬有机酸、可溶性糖含量和糖酸比在 L1 处理最大。

2)在一定灌水量范围内,减少灌水量可提高 SS 和 SPS 活性而加速了蔗糖的合成,抑制 AI 和 NI 活性而减缓蔗糖分解成果糖和葡萄糖,进而提高了蔗糖的合成量而改善了品质;冬春茬 SS 和 SPS 活性最大、果糖和葡萄糖含量最高及 AI 活性最低均出现在灌水量水平为 L2,夏秋茬 SPS 和 SS 活性及果糖含量在 L1 处理最大。

3)根据主成分综合分析得出,冬春茬 L2P1 处理综合得分最优,夏秋茬 L1P1 处理最优即冬春茬苗期、开花坐果期、盛果期至拉秧分别灌水 150、200、400 ml·株⁻¹·天⁻¹,每天灌水一次;夏秋茬苗期、开花坐果期、盛果期至拉秧分别灌水 300、600、900 ml·株⁻¹·天⁻¹,每天灌水两次。

参 考 文 献:

[1] Wang F, Kang S Z, Du T S, et al. Determination of comprehensive quality index for tomato and its response to different irrigation treatments [J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98 (8): 1228-1238.

[2] 杨再强,邱泽萱,谭文,等. 土壤水分胁迫对设施番茄根系及地上部生长的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(3): 748-757.

[3] 杨再强,谭文,陈艳秋,等. 土壤水分胁迫对设施番茄叶片气孔特性的影响[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(5): 1234-1240.

[4] 王聪聪. 日光温室番茄优质高效灌溉控制指标研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2011.

[5] Salokhe V M, Babel M S, Tantau H J. Water requirement of drip irrigated tomatoes grown in greenhouse in tropical environment[J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 71(3): 225-242.

[6] 周啸尘. 灌水量与追肥量对番茄产量和品质的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2014.

[7] 安顺伟,王军,肖长坤,等. 不同滴灌量对日光温室番茄生长,产量和品质的影响[J]. *中国园艺文摘*, 2013, 29 (8): 28-29.

[8] Zeng C Z, Bie Z L, Yuan B Z. Determination of optimum irrigation water amount for drip-irrigated muskmelon (*Cucumis melo* L.) in plastic greenhouse[J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(4): 595-602.

[9] 郭文忠,陈青云,高丽红,等. 设施蔬菜生产节水灌溉制度研究现状及发展趋势[J]. *农业工程学报*, 2005(S2): 24-27.

[10] Baselga Yrisarry J J, Prieto Losada M H, Del rodrcón A R. Response

of processing tomato to three different levels of water and nitrogen applications[J]. *Acta Horticulturae*, 1993,335:149-153.

[11] 祁娟霞,刘馨,张雪艳,等. 不同灌水量和灌水频率对番茄植株生长、光合与荧光特性的影响[J]. *节水灌溉*, 2017(4): 50-56.

[12] Costa J M, Ortuño M F, Chaves M M. Deficit irrigation as a strategy to save water: physiology and potential application to horticulture[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2007, 49(10):1421-1434.

[13] Topcu S, Kirda C, Dasgan Y, et al. Yield response and N-fertiliser recovery of tomato grown under deficit irrigation[J]. *European Journal of Agronomy*, 2007, 26(1): 64-70.

[14] Javanmardi J, Kubota C. Variation of lycopene, antioxidant activity, total soluble solids and weight loss of tomato during postharvest storage[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2006, 41 (2): 151,155.

[15] 时学双,李法虎,闫宝莹,等. 不同生育期水分亏缺对春青稞水分利用和产量的影响[J]. *农业机械学报*, 2015,46(10): 144-151 +265.

[16] 邢文刚,李志忠,陈泰雄,等. 滴灌对番茄生长及产量的影响[J]. *人民黄河*, 2010(5): 72-74.

[17] 陈俊伟,张上隆,张良诚. 果实中糖的运输,代谢与积累及其调控[J]. *植物生理与分子生物学学报*, 2004, 30 (1): 1-10.

[18] Zhang X, Wollenweber B, Jiang D, et al. Water deficits and heat shock effects on photosynthesis of a transgenic *Arabidopsis thaliana* constitutively expressing ABP9, a bZIP transcription factor [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2008, 59(4):839-848.

[19] 崔秀敏,王秀峰. 基质供水状况对番茄穴盘苗碳氮代谢及生长发育的影响[J]. *园艺学报*, 2004, 31(4): 477-481.

[20] 冯樸玉. 番茄果实糖分累积对水分与钾素供应的响应及其机理[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2016.

[21] 牛文全,古君,梁博惠,等. 水分亏缺条件下毛管理深对番茄生长、产量及品质的影响[J]. *农业机械学报*, 2017,48(3): 279-287.

[22] Kuşçu H, Turhan A, Demir A O. The response of processing tomato to deficit irrigation at various phenological stages in a sub-humid environment[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 133:92-103.

[23] 王峰,杜太生,邱让建,等. 亏缺灌溉对温室番茄产量与水分利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2010,26(9): 46-52.

[24] 陆红飞,郭相平,甄博,等. 成熟期水盐胁迫对番茄产量和贮藏期品质的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2015, 34(6): 15-19.

[25] 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.

[26] Wang X K, Ying Y Y. Evaluation of the effect of irrigation and fertilization by drip fertigation on tomato yield and water use efficiency in greenhouse[J]. *International Journal of Agronomy*, 2016:1-10.

[27] 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):590-59.

[28] 韩国君,陈年来,黄海霞,等. 番茄叶片光合作用对快速水分胁迫的响应[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(4): 1017-1022.

[29] 赵智中,张上隆,徐昌杰,等. 蔗糖代谢相关酶在温州蜜柑果实糖积累中的作用[J]. *园艺学报*, 2001, 28(2): 112-118.

[30] 陈秀香,马富裕,方志刚,等. 土壤水分含量对加工番茄产量和品质影响的研究[J]. *节水灌溉*, 2006(4): 1-4.