

网络出版时间:2013-01-25 17:19

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20130125.1719.005.html>

分根区交替灌溉条件下水肥供应对番茄可溶性糖含量的影响

李 瑞^a, 牛晓丽^b, 周振江^b, 王旭东^a, 胡田田^b

(西北农林科技大学 a 资源环境学院, b 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

【摘要】 **【目的】**研究分根区交替灌溉条件下水肥供应对番茄可溶性糖含量的影响。**【方法】**采用五元二次正交旋转组合设计,通过盆栽试验,研究根系分区交替灌溉条件下,灌水量及氮、磷、钾肥和有机肥用量对番茄果实中可溶性糖含量的影响。通过回归分析,建立了番茄果实可溶性糖含量与水肥因子的数学模型,并对各单一因素及两两因素的耦合效应进行了分析。**【结果】**在供试条件下,当其他因子为中间水平时,番茄果实可溶性糖含量与灌水量、施磷量和有机肥用量呈线性正相关关系;随着施钾量的增加,可溶性糖含量呈开口向下的抛物线型变化,但其不受施氮量的明显影响。5个因素对番茄可溶性糖含量的交互效应表现为:施氮量与施磷量、施钾量,施钾量与有机肥用量间呈负交互作用;施氮量与有机肥用量、施磷量与施钾量间呈正交互作用。表明灌水量及氮、磷、钾和有机肥用量,通过单因素本身或与其他因素之间的交互作用,对番茄果实可溶性糖含量产生显著影响。**【结论】**根系分区交替灌水条件下,适当增大灌水量,氮肥与有机肥、磷肥与钾肥以及高量有机肥与少量钾肥配施,均可以明显提高番茄果实中的可溶性糖含量。

【关键词】 分根区交替灌溉;五元二次正交旋转组合设计;可溶性糖;灌水量;施肥量;番茄

【中图分类号】 S641.201;S641.205 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1671-9387(2013)03-0124-09

Effects of water and fertilizers on tomato soluble sugar contents under alternate partial root-zone irrigation

LI Rui^a, NIU Xiao-li^b, ZHOU Zhen-jiang^b, WANG Xu-dong^a, HU Tian-tian^b

(a College of Natural Resources and Environment, b College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: **【Objective】** The effects of irrigation and fertilizer amounts on soluble sugar contents of tomato were investigated under alternate partial root-zone irrigation. **【Method】** Using a quadratic orthogonal regressive rotation design with five factors, the effects of irrigation water amount and fertilizer amounts including nitrogen, phosphorus, potassium and manure on soluble sugar contents of tomato were investigated by pot experiment under alternate partial root-zone irrigation. A regression model on water and fertilizer amounts and soluble sugar contents of tomato was established. Single and coupling effects of all five experimental factors were analyzed. **【Result】** For the soil and tomato variety used in the experiment, the relationship between soluble sugar contents and K fertilizer amounts could be estimated as a second-degree parabola with open side down when other factors were at intermediate levels. Soluble sugar contents increased linearly with irrigation, P fertilizer and manure amounts, but were not affected by N fertilizer amounts. The

【收稿日期】 2012-06-26

【基金项目】 国家自然科学基金项目(51279169);国家“863”计划项目(2011AA100504)

【作者简介】 李 瑞(1988—),男,陕西神木人,在读硕士,主要从事农业节水理论研究。E-mail: liruibetter@126.com

【通信作者】 王旭东(1965—),男,河南唐河人,教授,博士生导师,主要从事土壤化学研究。E-mail: wangxudong01@126.com

interactions between the fertilizer amounts of N,P or K, between K and manure showed negative effects while the interactions between N fertilizer and manure amounts and between P and K fertilizer amounts were positive. 【Conclusion】 The results suggested that irrigation amount and fertilizer amounts of N,P,K and manure significantly influenced soluble sugar contents in tomato through single factor or their interactions. Under the condition of alternate partial root-zone irrigation, increasing the amount of irrigation in a proper way, application of N and manure, K and P, and a high level of manure and a small amount of K can significantly improve soluble sugar contents in tomato.

Key words: alternate partial root-zone irrigation; quadratic orthogonal regressive rotation design with five factors; soluble sugar content; irrigation amount; fertilizer amounts; tomato

番茄果实中的糖分含量是决定其品质的关键因素^[1]。果实中可溶性糖的含量,除了取决于其遗传特性外,还与灌水、施肥、光照和温度等环境因子密切相关。其中,肥料和水分是影响园艺产品产量和品质的主要因素^[2]。水和肥是密不可分的 2 类作物生长因子,二者之间相互影响、相互作用,共同影响作物的生长及产品品质^[3]。然而,目前的研究大多集中于水肥单因子或不同肥料配比的效果上^[4-6],综合考虑灌水量和氮、磷、钾、有机肥用量 5 个因素的研究还鲜见报道。

分根区交替灌溉(Alternate partial root-zone irrigation, APRI)是在作物某些生育期或全部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灌溉方式,将作物部分根系在水分胁迫条件下产生的根源信号脱落酸(ABA)传输至地上部叶片,调节气孔保持最优开度,达到不牺牲光合产物积累、大量减少其奢侈的蒸腾耗水而节水的目的。目前关于根系分区交替灌溉对作物生理特性及产量与品质影响的研究较多^[7-9],关于局部灌溉条件下水肥供应对农作物产量的影响也有不少报道^[10],然而截至目前,关于分根区交替灌溉条件下水肥用量对农产品品质的影响方面,尚未见报道。因此,本研究在分根区交替灌溉条件下,应用五元二次正交旋转组合设计,通过回归分析、单因素效应及交互效应分析,研究番茄果实可溶性糖含量对灌水量和氮、磷、钾及有机肥用量的响应,以期分为根区交替灌溉条件下番茄的优质生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

盆栽试验于 2010-05-10 在西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室进行。供试番茄品种为“毛粉 802”。供试土壤为壤土,土壤基本理化性质为:土壤干体积质量 1.30 g/cm^3 ,有机质

6.18 g/kg ,全氮 0.81 g/kg ,全磷 0.42 g/kg ,全钾 13.80 g/kg ,碱解氮 10.93 mg/kg ,速效磷 4.18 mg/kg ,速效钾 102.30 mg/kg ,田间持水量(θ_f)为 24% 。

试验装置为自制分根装置(高 30 cm ,直径 30 cm ,中间用高 24 cm 的隔板分成左右 2 个半区,隔板中间裁设三角形的开口)。为了防止滞水,每桶底部装河沙 2 kg 。每桶装风干土 21 kg ,装土体积质量 1.30 g/cm^3 。为使灌水区均匀湿润、防止土壤板结和减少表土蒸发,每桶各插 2 个灌水管(直径 2.5 cm ,长 25 cm ,上有 3 排孔),水分通过灌水管灌入。2010-06-05 移栽定植,定植时将番茄幼苗置于隔板 V 形缺口的正上方,确保根系分布均匀。定植后立即浇水使土壤含水量至 θ_f 。待缓苗期过后,当土壤含水量降至 $65\%\theta_f$ 时,开始采用根系分区交替灌水。09-10-10-05 采收并进行测定。

1.2 试验设计

试验因素为灌水量、施氮量、施磷量、施钾量以及有机肥用量,采用五元二次正交旋转组合设计的 $1/2$ 实施,共 36 个处理^[11],3 次重复。根据前人研究结果,番茄正常生长所需氮磷钾的比例 $m(\text{N}) : m(\text{P}_2\text{O}_5) : m(\text{K}_2\text{O})$ 为 $1 : 0.55 : 0.88$ ^[12],目前番茄的适宜施肥量为纯 N $0.21 \sim 0.28 \text{ g/kg}$, P_2O_5 $0.11 \sim 0.14 \text{ g/kg}$, K_2O $0.180 \sim 0.23 \text{ g/kg}$,有机肥 $18 \sim 23 \text{ g/kg}$ ^[13-16]。考虑到供试土壤的肥力水平,为了探索番茄品质随肥料用量的变化规律,试验设计使零水平接近番茄正常生长的合适水平,并使肥料用量覆盖从低肥至中肥到高肥的肥力水平。试验采用恒质量法灌水,根据零水平处理的灌水量确定其他水平的灌水时间及灌水量。零水平灌水量(W)是将一半根区土壤含水量由 $65\%\theta_f$ 灌至 θ_f 所需水量,其他水平的灌水量根据零水平进行计算。各处理灌水时间相同。为节省篇幅,略去详细的试验方案,仅将各因素具体的上下水平及变化间距列于表 1。

表 1 试验因素与水平编码表

Table 1 Experimental factors and their codes

因素 Factors	变化间距 Interval	变量设计水平及编码 Variable amounts and their codes				
		−2	−1	0	1	2
灌水量(X_1) Irrigation amount	1/3W	1/3W	2/3W	W	4/3W	5/3W
施氮量(X_2)/(g·kg ^{−1}) N fertilizer amount	0.12	0	0.12	0.24	0.36	0.48
施磷量(X_3)/(g·kg ^{−1}) P fertilizer amount	0.066	0	0.066	0.132	0.198	0.264
施钾量(X_4)/(g·kg ^{−1}) K fertilizer amount	0.105	0	0.105	0.210	0.315	0.420
有机肥用量(X_5)/(g·kg ^{−1}) Manure amount	10	0	10	20	30	40

注:W 为零水平的灌水量。
Note:W indicates the middle irrigation amount.

试验用氮、磷、钾肥料分别为尿素(含 N 量为 46%)、过磷酸钙(含 P₂O₅ 为 15%)和硫酸钾(含 K₂O 为 50%),有机肥料为腐熟的牛粪。有机肥和磷肥作为基肥一次性施入。氮肥和钾肥按照基肥追肥质量比为 1∶2 施用,追肥分别在第 1 穗果膨大期和第 2 穗果膨大期进行,追肥方法为穴施。

1.3 测定项目与方法

番茄可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定^[17]。

1.4 数据统计与分析

根据二次回归正交旋转组合设计的计算原理,采用统计软件 DPS 和 Microsoft Excel 2003,对可溶性糖的测定结果进行分析处理,建立可溶性糖含量与试验因子的数学模型。

2 结果与分析

2.1 番茄可溶性糖含量与灌水量及氮、磷、钾和有机肥用量间的关系

根据试验结果,采用统计软件 DPS 中五元二次正交旋转组合设计的分析程序,建立番茄可溶性糖含量(Y)与灌水量(X_1)、施氮量(X_2)、施磷量(X_3)、施钾量(X_4)、有机肥用量(X_5)之间的方程,最终的简化模型为:

$$Y=2.911+0.195X_1+0.106X_3+0.225X_5-0.076X_4^2-0.236X_2X_3-0.149X_2X_4+0.163X_2X_5+0.202X_3X_4-0.093X_4X_5。(1)$$

方差分析结果表明, $F=4.655>F_{0.01}(12,23)=3.07$,说明模拟的回归关系达到极显著水平,能反映番茄可溶性糖的变化过程,可以作为预测预报可溶性糖含量的依据。

各项回归系数的 F 值依次为 $F_1=9.707, F_3=2.843, F_5=12.97, F_{4-4}=1.951, F_{2-3}=9.477, F_{2-4}=3.788, F_{2-5}=4.512, F_{3-4}=6.968, F_{4-5}=1.462(F_{0.25(1,23)}=1.40, F_{0.1(1,23)}=2.94, F_{0.05(1,23)}=$

$4.28, F_{0.01(1,23)}=7.88)$,可知一次项 X_3 和二次项 X_4^2 达显著水平,一次项 X_1 和 X_5 达极显著水平,表明在试验条件下,施磷量和施钾量对番茄可溶性糖含量有一定影响,灌水量和有机肥施用量对可溶性糖含量有重要作用。在交互项中, X_2X_3 达到极显著水平, X_2X_4 、 X_2X_5 、 X_3X_4 、 X_4X_5 均达到显著水平,说明施氮量和施磷量的交互作用最显著,氮肥与钾肥、有机肥,磷肥与钾肥、钾肥与有机肥用量间均有一定的交互效应。

2.2 单一因素对番茄可溶性糖含量的影响

由于试验设计满足正交性,模型中各项偏回归系数彼此独立,因此,可对回归模型进行降维,固定其他因素为零水平,使得各因素对番茄可溶性糖的一元二次偏回归模型如下^[3]:

$$\text{灌水量:} Y_1=2.911+0.195X_1, (2)$$

$$\text{施氮量:} Y_2=2.911, (3)$$

$$\text{施磷量:} Y_3=2.911+0.106X_3, (4)$$

$$\text{施钾量:} Y_4=2.911-0.076X_4^2, (5)$$

$$\text{有机肥用量:} Y_5=2.911+0.225X_5。 (6)$$

根据以上 5 个模型,可绘出番茄可溶性糖含量与单一因素间的关系,结果见图 1。从图 1 可以看出,番茄可溶性糖含量与灌水量、施磷量和有机肥用量间的关系类似,均呈正相关线性关系,表明番茄可溶性糖含量随灌水量、施磷量和有机肥用量的增大而增加。番茄可溶性糖含量随施钾量的变化呈现为先上升后下降的趋势,说明在一定的施钾量水平下可以获得最高的可溶性糖含量。施氮量对番茄可溶性糖含量的影响与其他因素有所不同,在试验条件下,番茄可溶性糖含量未随施氮量的增加发生明显变化。当施磷量和施钾量均为 0 g/kg、灌水量为 5/3W、施氮量为 0.48 g/kg、有机肥施用量为 40 g/kg 时,番茄可溶性糖含量可以达到最大值 62.6 g/kg。

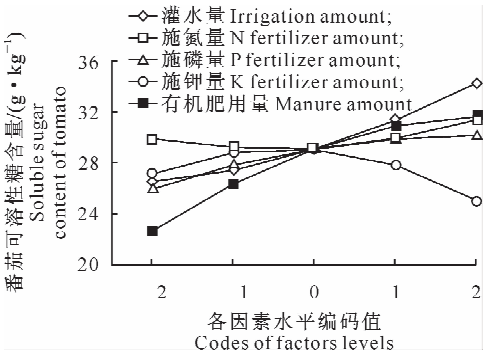


图 1 不同单一因素对番茄可溶性糖含量的影响
Fig. 1 Effects of different single experimental factors on soluble sugar contents in tomato

2.3 两因素对番茄果实可溶性糖含量的耦合效应

番茄果实可溶性糖含量受多因素的影响,任何单项农艺措施的作用都不是孤立存在的。在复因素试验中,只有对因子间的交互作用进行分析才能揭示事物本身的内在联系。在本试验中,5 个因子两两组合的关系有 10 种。经方差分析,变量中比较显著的交互项有 X_2X_3 、 X_2X_4 、 X_2X_5 、 X_3X_4 和 X_4X_5 。

表 2 施氮量与施磷量对番茄可溶性糖含量影响的耦合效应

Table 2 Coupling effect of N and P fertilizer amounts on soluble sugar contents in tomato

施磷量水平编码 P fertilizer level codes	不同施氮水平下的可溶性糖含量/(g·kg ⁻¹) N fertilizer amounts on soluble sugar content					$\bar{x}/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	S	CV/%
	-2	-1	0	1	2			
-2	17.6	22.3	27.0	31.7	36.4	27.0	7.92	29.33
-1	23.3	25.7	28.1	30.4	32.8	28.1	4.10	14.59
0	29.1	29.1	29.1	29.1	29.1	29.1	0.00	0.00
1	34.9	32.5	30.2	27.8	25.4	30.2	4.10	13.58
2	40.7	35.9	31.2	26.5	21.8	31.2	7.95	25.48
$\bar{x}/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	29.1	29.1	29.1	29.1	29.1			
S	8.35	5.72	1.66	2.61	6.35			
CV/%	28.69	19.66	5.70	8.97	21.82			

2.3.2 施氮量(X_2)和施钾量(X_4)的耦合效应 采用“降维法”得施氮量(X_2)和施钾量(X_4)的交互作用编码方程为:

$$Y=2.911-0.076X_4^2-0.149X_2X_4。$$
 (8)

由式(8)可知,施氮量和施钾量的交互项系数为-0.149,二者间存在负的交互效应。从表 3 可以看出,当施钾量处于低水平时,随着施氮量的增加,番茄可溶性糖含量逐渐增加,增幅随施钾量的增加而减小;当施钾量为中间水平时,随着施氮量的增加,番茄可溶性糖含量保持不变;当施钾量为高水平时,随着施氮量的增加,番茄可溶性糖含量明显降低,而且减小幅度随施钾量增加而增大。当施氮量为最低水平时,随着施钾量的增加,番茄可溶性糖含量逐渐

2.3.1 施氮量(X_2)和施磷量(X_3)的耦合效应 采用“降维法”得施氮量(X_2)和施磷量(X_3)的耦合效应编码方程为:

$$Y=2.911+0.106X_3-0.236X_2X_3。$$
 (7)

根据方程可得施氮量和施磷量对番茄可溶性糖的耦合效应值,结果见表 2。从表 2 可以看出,当施磷量处于低水平时,随着施氮量的增加,番茄可溶性糖含量逐渐增加,但最低水平时的增幅较大;当施磷量处于中间水平时,随着施氮量的增加,番茄可溶性糖含量保持不变;当施磷量处于高水平时,随着施氮量的增加,番茄可溶性糖含量明显降低,而且最高水平时的降幅较大。当施氮量处于中、低水平时,随着施磷量的增加,番茄可溶性糖含量逐渐增加,且氮水平越低增幅越大;当施氮量处于高水平时,随着施磷量的增加,可溶性糖含量逐渐降低,且最高水平下的降幅较大。高施磷量配低施氮量(施磷量为 0.264 g/kg,施氮量为 0 g/kg)时,番茄可溶性糖含量可达最高值 40.7 g/kg。可见,在本试验条件下,氮磷肥用量间存在明显的负交互效应。

增加;施氮量为最高水平时,可溶性糖含量随施钾量的增加而减小;施氮量为中水平及次低和次高水平时,可溶性糖含量随施钾量的增加呈先增加后降低的变化趋势。高施钾量配低施氮量(施钾量为 0.420 g/kg,施氮量为 0 g/kg)、或者低施钾量配高施氮量(施钾量为 0 g/kg,施氮量为 0.48 g/kg)时,番茄可溶性糖含量可达最高值 32.0 g/kg。可见,施用较大的钾肥和较少量的氮肥或施用较少量的钾肥和较大的氮肥时,番茄可溶性糖含量较高。

2.3.3 施氮量(X_2)和有机肥用量(X_5)的耦合效应 采用“降维法”得施氮量(X_2)和有机肥用量(X_5)的交互作用编码方程为:

$$Y=2.911+0.225X_5+0.163X_2X_5。$$
 (9)

由式(9)可知,施氮量和有机肥用量的交互项系数为 0.163,表现为正的交互效应,表明二者交互作用是促进番茄可溶性糖的累积。从表 4 可知,当有机肥量为低水平时,随施氮量的增加,番茄可溶性糖含量逐渐降低,且降低幅度随有机肥用量的减小而增大;当有机肥量为中间水平时,可溶性糖含量不随施氮量变化;当有机肥量为高水平时,番茄可溶性糖

含量随施氮量的增加而增大,而且增加幅度随有机肥用量增加而增大。当施氮量为最低水平时,番茄可溶性糖含量随有机肥用量的增加而逐渐降低;随氮肥用量的增加,番茄可溶性糖含量随有机肥用量的增大而增加,且增幅也明显增大。高量有机肥配施高量氮肥(有机肥施用量为 40 g/kg,施氮量为 0.48 g/kg),番茄可溶性糖含量可达最高值 40.1 g/kg。

表 3 施氮量和施钾量对番茄可溶性糖含量影响的耦合效应

Table 3 Coupling effect of N and K fertilizer amounts on soluble sugar contents in tomato

施钾量水平编码 K fertilizer level codes	不同施氮水平下的可溶性糖含量/(g·kg ⁻¹) N fertilizer amounts on soluble sugar content					$\bar{x}/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	S	CV/%
	-2	-1	0	1	2			
-2	20.1	23.1	26.1	29.1	32.0	26.1	4.41	16.90
-1	25.4	26.9	28.4	29.8	31.3	28.4	2.53	8.91
0	29.1	29.1	29.1	29.1	29.1	29.1	0.00	0.00
1	31.3	29.8	28.4	26.9	25.4	28.4	2.53	8.91
2	32.0	29.1	26.1	23.1	20.1	26.1	4.71	18.05
$\bar{x}/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	27.6	27.6	27.6	27.6	27.6			
S	4.71	2.45	1.27	2.45	4.71			
CV/%	17.07	8.88	4.60	8.88	17.07			

表 4 施氮量与有机肥用量对番茄可溶性糖含量影响的耦合效应

Table 4 Coupling effect of N fertilizer and manure amounts on soluble sugar contents in tomato

有机肥用量水平编码 Manure level codes	不同施氮水平下的可溶性糖含量/(g·kg ⁻¹) N fertilizer amounts on soluble sugar content					$\bar{x}/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	S	CV/%
	-2	-1	0	1	2			
-2	31.1	27.9	24.6	21.3	18.1	24.6	5.15	20.93
-1	30.1	28.5	26.9	25.2	23.6	26.9	2.58	9.59
0	29.1	29.1	29.1	29.1	29.1	29.1	0.00	0.00
1	28.1	29.7	31.4	33.0	34.6	31.4	2.58	8.22
2	27.1	30.4	33.6	36.9	40.1	33.6	5.15	15.33
$\bar{x}/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	29.1	29.1	29.1	29.1	29.1			
S	1.58	0.98	3.56	6.17	8.70			
CV/%	5.43	3.37	12.23	21.20	29.90			

2.3.4 施磷量(X_3)和施钾量(X_4)的耦合效应 采用“降维法”得施磷量(X_3)和施钾量(X_4)的交互作用编码方程为:

$$Y=2.911+0.106X_3-0.076X_4^2+0.202X_3X_4。$$

(10)

由式(10)可知,施磷量、施钾量间的交互项系数为 0.202,二者间存在正交互作用,表明二者的交互作用可以明显增加番茄可溶性糖的累积。从表 5 可以看出,当施磷量为最低水平时,随施钾量的增加,番茄可溶性糖含量逐渐降低;施磷量为最高水平时,可溶性糖含量随施钾量的增加而明显增大;当施磷量为较低、中水平和较高水平时,随着施钾量的增加,可溶性糖含量先增加后降低。当施钾量为低水平时,随着施磷量的增加,可溶性糖含量逐渐降低,

降低幅度随施钾量增大而减小;当施钾量处于中、高水平时,随着施磷量的增加,可溶性糖含量逐渐增加,且增加幅度也随之增大。高施磷量配高施钾量(施磷量为 0.264 g/kg,施钾量为 0.420 g/kg),有利于提高番茄的可溶性糖含量。

2.3.5 施钾量(X_4)和有机肥用量(X_5)的耦合效应 采用“降维法”得施钾量(X_4)和有机肥用量(X_5)的交互作用编码方程为:

$$Y=2.911+0.225X_5-0.076X_4^2-0.093X_4X_5。$$

(11)

由式(11)可知,施钾量和有机肥用量间的交互项系数为-0.093,二者间存在负交互效应,其耦合效应如表 6 所示。从表 6 可以看出,不论钾肥用量处于何种水平,随着有机肥用量的增加,番茄可溶性

糖含量均逐渐增加,但增加幅度随施钾量的增加而减小。不论有机肥用量处于何水平,随着施钾量的增加,番茄可溶性糖含量均呈现先增加后降低的变

化规律,高量有机肥配施少量钾肥(有机肥施用量为 40 g/kg,施钾量为 0. 105 g/kg),可以获得较高的可溶性糖含量(34. 7 g/kg)。

表 5 施磷量与施钾量对番茄可溶性糖含量影响的耦合效应

Table 5 Coupling effect of P and K fertilizer amounts on soluble sugar contents in tomato

施磷量水平编码 P fertilizer level codes	不同施钾水平下的可溶性糖含量/(g·kg ⁻¹) K fertilizer amounts on soluble sugar content					$\bar{x}/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	S	CV/%
	-2	-1	0	1	2			
-2	32. 1	30. 3	27. 0	22. 2	15. 9	25. 5	6. 04	23. 69
-1	29. 1	29. 3	28. 1	25. 3	21. 0	26. 6	3. 13	11. 77
0	26. 1	28. 4	29. 1	28. 4	26. 1	27. 6	1. 27	4. 60
1	23. 1	27. 4	30. 2	31. 4	31. 2	28. 7	3. 13	10. 91
2	20. 1	26. 4	31. 2	34. 5	36. 3	29. 7	5. 86	19. 73
$\bar{x}/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	26. 1	28. 4	29. 1	28. 4	26. 1			
S	4. 74	1. 53	1. 66	4. 85	8. 06			
CV/%	18. 16	5. 39	5. 7	17. 08	30. 88			

表 6 施钾量与有机肥用量对番茄可溶性糖含量影响的耦合效应

Table 6 Coupling effect of K fertilizer and manure amounts on soluble sugar contents in tomato

施钾量水平编码 K fertilizer level codes	不同有机肥用量水平下的可溶性糖含量/(g·kg ⁻¹) Manurer amounts on soluble sugar content					$\bar{x}/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	S	CV/%
	-2	-1	0	1	2			
-2	17. 9	22. 0	26. 1	30. 2	34. 3	26. 1	6. 48	24. 83
-1	22. 0	25. 2	28. 4	31. 5	34. 7	28. 4	5. 01	17. 64
0	24. 6	26. 9	29. 1	31. 4	33. 6	29. 1	3. 56	12. 23
1	25. 7	27. 0	28. 4	29. 7	31. 0	28. 4	2. 10	7. 39
2	23. 4	24. 8	26. 1	27. 4	28. 7	26. 1	2. 09	8. 01
$\bar{x}/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	22. 7	25. 2	27. 6	30. 0	32. 5			
S	2. 95	2. 03	1. 27	1. 49	2. 26			
CV/%	13. 00	8. 06	4. 60	4. 97	6. 95			

2. 4 模型寻优

根据已建立的番茄可溶性糖含量与灌水量及氮、磷、钾和有机肥用量间的数学模型(式(1)),在 $-2 \leq X_i \leq 2(i=1,2,3,4,5)$ 范围内取步长为 1 进行计算机模拟,求得番茄可溶性糖含量大于平均值 28. 6 g/kg 的方案有 1 249 个,采用频数分析法可得

出试验条件下番茄可溶性糖含量在 95%置信区间时各因子的优化配比方案为:灌水量(1. 114~1. 164)W,施氮量 0. 239~0. 258 g/kg,施磷量 0. 150~0. 160 g/kg,施钾量 0. 193~0. 208 g/kg,有机肥用量 24. 95~26. 36 g/kg,各因子配比方案及各变量取值的频率分布见表 7。

表 7 番茄可溶性糖含量大于平均值 28. 6 g/kg 时的各因子取值频率分布及配比方案

Table 7 Factor frequency distribution and proportioning plan when soluble sugar contents in tomato larger than the average of 28. 6 g/kg

水平编码 Variable amounts and codes	各因子取值频率 Factor frequency distribution				
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅
-2	0. 122	0. 190	0. 152	0. 176	0. 082
-1	0. 157	0. 181	0. 138	0. 230	0. 139
0	0. 195	0. 211	0. 187	0. 250	0. 208
1	0. 237	0. 207	0. 254	0. 200	0. 271
2	0. 290	0. 211	0. 269	0. 144	0. 299
总次数 Total number	1 249	1 249	1 249	1 249	1 249
编码加权均数 Weighted average	0. 416	0. 069	0. 350	-0. 094	0. 565
标准差 Standard error	0. 039	0. 040	0. 040	0. 037	0. 036
95%置信区间 95% confidence interval	0. 341~0. 492	-0. 009~0. 147	0. 272~0. 427	-0. 166~-0. 021	0. 495~0. 636

3 讨 论

本研究结果表明,在分根区交替灌溉条件下,番茄可溶性糖含量与施钾量间呈开口向下的抛物线型变化,表明随施钾量增大,可溶性糖含量逐渐增大,但增大到一定程度后呈减小趋势。均匀灌水条件下的研究表明,增施钾肥对菠菜、西瓜和茄子等果实中糖的合成与积累均有良好的促进作用^[18-19],但大白菜的含糖量与钾肥施用量没有明显的相关性^[20],而洋葱的含糖量与钾肥施用量呈负相关^[21],钾肥对可溶性糖含量的影响与其用量有关^[22],说明施钾量对番茄可溶性糖含量的影响比较复杂,需要进一步深入研究。

本研究发现,分根区交替灌溉条件下,在氮、磷、钾和有机肥用量为中间水平时,番茄可溶性糖含量随灌水量的增大而增加。均匀灌水条件下的研究表明,在一定灌水量范围内,可溶性糖含量随灌水量的增加而增大,但过多水量会降低果穗含糖量^[23]。本研究中,番茄可溶性糖含量随灌水量的增加而增加,可能与试验采用根系局部灌水方式、番茄始终有一半根系处在干旱胁迫条件,且灌水区的水分供应也不存在水分过多的情况有关,例如对于中间水分水平,灌水区的土壤含水量控制在 θ_f 的65%~100%;对于高水分水平,其灌水量尽管是中间水平的5/3倍,但由于番茄生长正值夏季,强烈的蒸发蒸腾作用,使其水分供应可能尚未超过降低可溶性糖含量的临界值,这还需进一步深入研究。

关于番茄可溶性糖含量随施氮量单一因子变化规律的研究结果表明,在灌水量及磷、钾和有机肥用量为中间水平时,可溶性糖含量不随施氮量发生明显变化;但与其他因素具有交互效应时,番茄可溶性糖含量随施氮量也有明显变化。例如,当施磷量处于低水平时,随着施氮量的增加,番茄可溶性糖含量逐渐增加,但最低水平时的增幅较大;当施磷量处于高水平时,随着施氮量的增加,可溶性糖含量明显降低,而且最高水平时的降幅较大。前人研究表明,随着氮素施用量的增加,盆栽番茄果实还原糖含量提高^[24]。但也有研究表明,氮肥用量过高,钾肥相对不足,会影响番茄果实中糖的积累,降低可溶性糖含量^[25-26]。说明施氮量对番茄可溶性糖的影响与施氮量及其他元素的供应状况均有密切关系。

目前,关于灌水量及氮、磷、钾肥用量双因素对蔬菜品质的影响方面的研究有许多^[27-28],但尚无明确分析其交互作用的报道。本研究发现,氮、钾肥用

量对番茄可溶性糖含量呈负交互作用,这可能与二者对植物碳氮代谢的影响有关。钾素既可以通过提高氮素代谢相关酶活性、促进氨基酸向蛋白质合成场所的运输等,促进植物体内的氮素代谢;也可以通过促进同化物蔗糖的韧皮部运输、提高糖类代谢相关酶活性,来促进糖类物质在储藏器官中的累积^[29-30]。这两类生理过程本身的作用,决定了钾首先是对植物体结构物质——蛋白质、氨基酸等氮素化合物的代谢产生影响,其次才是对产品品质——糖类物质的合成与积累造成影响,从而导致当供氮量增大时,钾素在促进氮素代谢的同时,可能对糖类的积累产生抑制作用。前人研究认为,同一作物中蛋白质和糖类的增长是不能同步的^[31],进一步证实了氮、钾之间对可溶性糖累积负交互作用的存在,其具体机理有待进一步研究。

本研究结果表明,氮、磷肥用量对番茄可溶性糖含量表现为负的交互作用。其原因可能在于,磷素尽管有利于糖类物质的积累^[32],但施磷也可以促进植物对氮素的吸收与利用^[33-34],而过多的氮素不利于糖类物质的合成与积累^[31,33]。本研究中,施钾量与有机肥用量间呈负的交互作用,可能与有机肥中含有大量的氮素养分^[22],从而导致了氮、钾之间对番茄可溶性糖累积负交互作用的发生有关。氮、磷、钾均是植物必需的大量元素,参与蛋白质代谢、碳水化合物代谢以及能量代谢等过程,并通过这些生理生化反应参与作物产品品质的形成过程^[32],其对番茄可溶性糖含量的影响是非常复杂的,其内部的生理机制目前尚未探明,还有待深入研究。

4 结 论

通过盆栽试验,采用五元二次正交旋转组合设计,研究了分根区交替灌溉条件下,灌水量和氮、磷、钾、有机肥用量5个因素对番茄果实可溶性糖含量的影响,通过分析得到如下主要结论:

1)在供试条件下,当其他因子为中间水平时,番茄果实可溶性糖含量与灌水量、施磷量和有机肥用量呈线性正相关关系;随施钾量的增加,可溶性糖含量呈开口向下的抛物线型变化,但不受施氮量的明显影响。

2)5个因素的交互效应对番茄可溶性糖含量的影响表现为:施氮量与有机肥用量、施磷量与施钾量表现为显著的正交互作用;施氮量与施磷量、施钾量,施钾量与有机肥用量间呈负交互效应。由耦合效应分析可知,氮肥与有机肥、磷肥与钾肥以及高量

有机肥与少量钾肥配施,均可以显著提高番茄果实中的可溶性糖含量。

3)所建立的水肥用量对番茄可溶性糖含量影响的数学模型,通过检验达到极显著水平,表明灌水量和氮、磷、钾、有机肥用量,或通过单因素本身、或与其他因素之间的交互作用,对番茄可溶性糖含量产生显著影响。只有合理的水肥管理措施,才能有效提高番茄可溶性糖含量,改善番茄品质。

4)通过模拟分析得到的最佳水肥耦合方案为:灌水量(1.114~1.164)W,施氮量 0.239~0.258 g/kg,施磷量 0.150~0.160 g/kg,施钾量 0.193~0.208 g/kg,有机肥用量 24.95~26.36 g/kg。

[参考文献]

- [1] 田春雨,刘野.番茄风味品质性状遗传研究进展[J].农业科技与装备,2009,3(6):3-5.
Tian C Y, Liu Y. Study on the heredity of tomato's flavor, quality and trait [J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2009, 3(6): 3-5. (in Chinese)
- [2] Phene C J, Huttmacher R B, Davis K R, et al. Water-fertilizer management of processing tomatoes [J]. Acta Horticulture, 1990, 277: 137-193.
- [3] 张秋英,刘晓冰,金剑,等.水肥耦合对大豆光合特性及产量品质的研究[J].干旱地区农业研究,2003,21(3):47-50.
Zhang Q Y, Liu X B, Jin J, et al. Influence of water and fertilizer coupling on photosynthetic characters and yield/quality of soybean [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2003, 21(3): 47-50. (in Chinese)
- [4] 张炎,马海刚,徐万里,等.施钾对加工番茄产量与品质的影响[J].中国土壤与肥料,2008(3):40-42.
Zhang Y, Ma H G, Xu W L, et al. Effect of potassium application on yield and quality of processing tomato [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2008(3): 40-42. (in Chinese)
- [5] 韩晓玲,张乃文,贾敬芬.生物有机无机复混肥对番茄产量、品质及土壤的影响[J].土壤肥料,2005(3):51-53.
Han X L, Zhang N W, Jia J F. Effect of biological organic-inorganic compound fertilizer on yield, quality of tomato and soil [J]. Soils and Fertilizers, 2005(3): 51-53. (in Chinese)
- [6] 张娜,张天财,张仲.不同肥料配比对大棚番茄品质与产量的影响[J].浙江农业科学,2010(2):260-261.
Zhang N, Zhang T C, Zhang Z. Influence of different fertilizer combination on the quality and yield of greenhouse tomato [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2010(2): 260-261. (in Chinese)
- [7] Wakrim R, Wahbi S, Tahi H, et al. Comparative effects of partial root drying (PRD) and regulated deficit irrigation (RDI) on water relations and water use efficiency in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) [J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2005, 106(2/3): 275-287.
- [8] 胡笑涛,康绍忠,张建华,等.番茄垂向分根区交替控制滴灌室

- 内试验及节水机理[J].农业工程学报,2005,21(7):1-5.
Hu X T, Kang S Z, Zhang J H, et al. Water-saving mechanism and efficiency of vertical partial-rootzone alternative controlled drip irrigation of tomato [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(7): 1-5. (in Chinese)
- [9] 吴燕,梁丽银,朱娟娟,等.灌溉方式对樱桃番茄产量和品质的影响[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2009,37(8):177-181.
Wu Y, Liang Y L, Zhu J J, et al. Effect of irrigation methods on yield and quality of cherry tomato [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2009, 37(8): 177-181. (in Chinese)
- [10] 农梦玲,李伏生,刘水.根区局部灌溉和氮、钾水平对玉米干物质积累和水肥利用的影响[J].植物营养与肥料学报,2010,16(6):1539-1545.
Nong M L, Li F S, Liu S. Effects of partial root-zone irrigation and N, K amounts on dry mass accumulation, water and nutrients use of maize [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(6): 1539-1545. (in Chinese)
- [11] 孙艳.温室土壤疲劳及其对蔬菜生长影响机理的研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2007.
Sun Y. The fatigue of greenhouse soil and its affection mechanism on the growth development of vegetable [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2007. (in Chinese)
- [12] 董洁,邹志荣,燕飞,等.不同施肥水平对大棚番茄产量和品质的影响[J].北方园艺,2009(12):38-41.
Dong J, Zou Z R, Yan F, et al. Effects of different fertilization levels on yield and quality of tomato in plastics greenhouse [J]. Northern Horticulture, 2009(12): 38-41. (in Chinese)
- [13] 李吉进,邹国元,宋东涛,等.有机肥和化肥对番茄产量和品质的影响[J].土壤通报,2009,40(6):1330-1332.
Li J J, Zou G Y, Song D T, et al. Influence of compost and chemical fertilizers on tomato yield and quality [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40(6): 1330-1332. (in Chinese)
- [14] 袁野,吴凤芝,周新刚.光氮互作对番茄果实糖积累及蔗糖代谢相关酶活性的影响[J].中国农业科学,2009,42(4):1331-1338.
Yuan Y, Wu F Z, Zhou X G. Interactive effects of light intensity and nitrogen supply on sugar accumulation and activities of enzymes related to sucrose metabolism in tomato fruits [J]. Scientia Agricultural Sinica, 2009, 42(4): 1331-1338. (in Chinese)
- [15] 齐红岩,李天来,张洁,等.番茄果实发育过程中糖的变化与相关酶活性的关系[J].园艺学报,2006,33(2):294-299.
Qi H Y, Li T L, Zhang J, et al. Relationship between carbohydrate change and related enzymes activities during tomato fruit development [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2006, 33(2): 294-299. (in Chinese)
- [16] 杨德.实验设计与分析[M].北京:中国农业出版社,2002:239-241.
Yang D. Design and analysis of experiments [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2002: 239-241. (in Chinese)

- [17] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- Wang X K. Plant biochemistry experiment principles and technology [M]. Beijing: High Education Press, 2006. (in Chinese)
- [18] 许前欣, 赵振达, 李秀文, 等. 钾肥对蔬菜产量品质效应研究 [J]. 土壤肥料学, 1999(2): 23-25.
- Xu Q X, Zhao Z D, Li X W, et al. Effect of K fertilizer on the quality of vegetable [J]. Soils and Fertilizers, 1999(2): 23-25. (in Chinese)
- [19] 马全民, 饶立华. 钾调节茎用芥菜同化物运输及茎部膨大的作用机理 [J]. 园艺学报, 1992, 19(4): 347-352.
- Ma Q M, Rao L H. Studies on mechanism of the action of potassium on the assimilate transport and stem expand of stem mustard [J]. Acta Horticulturae Sinica, 1992, 19(4): 347-352. (in Chinese)
- [20] 郭熙盛, 刘才字, 王文军, 等. 钾肥对洋葱产量、品质及养分吸收的影响 [J]. 中国蔬菜, 1999(2): 12-14.
- Guo X S, Liu C Y, Wang W J, et al. The effect of K fertilizer on the yield qualities and nutrient uptake of onion [J]. China Vegetables, 1999(2): 12-14. (in Chinese)
- [21] 周艺敏. 钾及其他元素配合施用对几种作物产量和品质的影响 [J]. 土壤肥料, 1995(1): 18-21.
- Zhou Y M. Effect of combined application of K and other fertilizers on yield and quality of crops [J]. Soils and Fertilizers, 1995(1): 18-21. (in Chinese)
- [22] 艾希珍, 崔志峰, 曲静然, 等. 施肥水平对生姜品质的影响 [J]. 山东农业大学学报, 1998, 29(2): 183-188.
- Ai X Z, Cui Z F, Qu J R, et al. Effects of different amounts of supplying fertilizer on ginger quality [J]. Journal of Shandong Agricultural University, 1998, 29(2): 183-188. (in Chinese)
- [23] 郑国保, 孔德杰, 张源沛, 等. 不同灌水量对日光温室番茄产量、品质 and 水分利用效率的影响 [J]. 北方园艺, 2011(11): 47-49.
- Zheng G B, Kong D J, Zhang Y P, et al. The effect of irrigation quantity on yield and quality and WUE of tomato in greenhouse [J]. Northern Horticulture, 2011(11): 47-49. (in Chinese)
- [24] 李远新, 李进辉, 何莉莉, 等. 氮磷钾配施对保护地番茄产量及品质的影响 [J]. 中国蔬菜, 1997(4): 10-13.
- Li Y X, Li J H, He L L, et al. The effect of N, P, K mixed application on yields and quality of tomato in solar greenhouse [J]. China Vegetables, 1997(4): 10-13. (in Chinese)
- [25] 齐红岩, 李天来, 周 璇, 等. 不同氮钾水平对番茄产量、品质及蔗糖代谢的影响 [J]. 中国农学通报, 2005, 21(11): 251-255.
- Qi H Y, Li T L, Zhou X, et al. Effects of different nitrogen and potassium levels on yield, quality and sucrose metabolism of tomato [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2005, 21(11): 251-255. (in Chinese)
- [26] 朱本岳. 氮磷钾不同用量和配比对番茄产量及品质的影响 [J]. 浙江农业科学, 1992(3): 131-133.
- Zhu B Y. Effects of different amounts and ratios of N, P, K on the yield and quality of tomato [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 1992(3): 131-133. (in Chinese)
- [27] 陈碧华, 邵庆炉, 杨和连, 等. 日光温室膜下滴灌水肥耦合技术对番茄生长发育的影响 [J]. 广东农业科学, 2008(8): 63-65, 78.
- Chen B H, Gao Q L, Yang H L, et al. Effect of water and fertilizer coupling on tomato growth and development under drip fertilization in solar-greenhouse [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2008(8): 63-65, 78. (in Chinese)
- [28] 梁运江, 许广波, 依艳丽. 水肥耦合效应对辣椒 Vc 含量的影响 [J]. 人民黄河, 2008, 30(10): 73-75.
- Liang Y J, Xu G B, Yi Y L. Effect of water and fertilizer coupling on the Vc contain in Chili [J]. Yellow River, 2008, 30(10): 73-75. (in Chinese)
- [29] 张恩平, 张淑红, 李天来, 等. 蔬菜钾素营养的研究现状与展望 [J]. 中国农学通报, 2005, 21(8): 265-268.
- Zhang E P, Zhang S H, Li T L, et al. Advance of research on potassium nutrition [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2005, 21(8): 265-268. (in Chinese)
- [30] 王凤婷, 艾希珍. 钾与蔬菜品质的相关性研究进展 [J]. 西北农业学报, 2004, 13(4): 183-186.
- Wang F T, Ai X Z. Research progress on relationship between potassium and vegetable quality [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2004, 13(4): 183-186. (in Chinese)
- [31] 沈中泉, 郭云桃, 袁家富. 有机肥料对改善农产品品质的作用及机理 [J]. 植物营养与肥料学报, 1995, 1(7): 54-60.
- Shen Z Q, Guo Y T, Yuan J F. Effect of organic manure on qualities of crops [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1995, 1(7): 54-60. (in Chinese)
- [32] 张振贤, 程智慧. 高级蔬菜生理学 [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2008.
- Zhang Z X, Cheng Z H. High physiology of vegetable [M]. Beijing: China Agriculture University Press, 2008. (in Chinese)
- [33] 刘玉超. 磷钾营养对水培番茄生长发育、产量及品质的影响 [D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2003.
- Liu Y C. Effects of phosphorus, potassium nutrition on growth, yield and quality of tomato on DET [D]. Tai'an, Shandong: Shandong Agricultural University, 2003. (in Chinese)
- [34] 张 涛, 闵 炬, 施卫明, 等. 不同磷钾肥配比对大棚蔬菜养分吸收、产量及品质的影响 [J]. 江苏农业学报, 2008, 24(5): 668-673.
- Zhang T, Min J, Shi W M, et al. Effects of chemical potash and phosphorus fertilizer input on yield, nutrient uptake and fruit quality of vegetables cultivated in plastic greenhouse [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2008, 24(5): 668-673. (in Chinese)