

根系分区交替灌溉条件下水肥供应对 番茄有机酸含量的影响

陈 思,牛晓丽,周振江,代顺冬,胡田田

(西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 采用分根法,通过盆栽试验,以四元二次回归正交旋转组合设计,研究了根系分区交替灌溉条件下灌水量和氮、磷、钾肥用量对番茄果实中有机酸含量的影响。通过回归分析,建立了番茄有机酸含量与水肥因子的数学模型。结果表明,在其他因子为中间水平时,番茄果实中的有机酸含量,随灌水量增加呈线性减小趋势;随施氮量增加表现为线性增长;随施磷量、施钾量增加呈开口向下抛物线型变化。交互效应表现为,灌水量与施钾量、施氮量与施磷量对番茄有机酸积累有显著的正交互作用。认为增施氮磷肥会增大番茄果实有机酸含量,合理施用钾肥、减小灌水量也促使番茄中有有机酸的积累。

关键词: 番茄;有机酸;灌水量;氮;磷;钾

中图分类号: S274.1; S641.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-7601(2013)04-0016-05

Effect of water and fertilizers on organic acid content of tomato under alternate partial root – zone irrigation

CHEN Si, NIU Xiao-li, ZHOU Zhen-jiang, DAI Shun-dong, HU Tian-tian

(Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Quadratic orthogonal regressive rotation design with four factors was used to investigate the effects of irrigation amount and fertilizer rates of nitrogen, phosphorus and potassium on organic acid content in tomato by pot experiment under alternate partial root-zone irrigation, and the regression model on water and fertilizer and organic acid content in tomato was established. The results showed that, if other factors were at zero codes, the organic acid content in tomato decreased linearly with the increase of irrigation amount, while it increased linearly with the increase of nitrogen fertilizer rate. The relationship between organic acid content and phosphorus fertilizer rate or potassium fertilizer rate showed a changing trend as opening downward parabola. There were positive interaction effects between irrigation amount and potassium fertilizer rate, and between nitrogen fertilizer rate and phosphorus fertilizer rate. It was indicated that increasing the fertilizer rates of nitrogen and phosphorus could raise the organic acid content of tomato effectively; proper application of potassium fertilizer and proper reduction of irrigation water could also improve the accumulation of organic acid in tomato.

Keywords: tomato; organic acid; irrigation amount; nitrogen; phosphorus; potassium

近年来,我国设施蔬菜生产发展迅猛,在蔬菜消费中人们越来越注重其风味与营养品质。苹果酸和柠檬酸等有机酸是番茄重要的风味品质性状之一,其含量的高低对番茄果实的风味以及营养价值都有着重要的影响。有机酸有增加胃液酸度,帮助消化,调整胃肠功能的作用,因此,受到世界各国专家的关

注。在蔬菜的设施生产中,由于大量施用化肥以及忽视肥料配比所造成的蔬菜品质下降及土壤酸化、肥力退化等现象非常普遍,蔬菜的优质与绿色生产成为研究者们关注的课题。与增光、保温等技术相比,研究者们对水肥管理技术重视不够,且已有的水肥调控研究多集中于水肥单因子或不同肥料配比的

收稿日期:2012-10-29

基金项目:国家自然科学基金项目(51279169,50939005);国家 863 计划项目(2011AA100504)

作者简介:陈 思(1987—),女,湖北荆门人,硕士研究生,研究方向为节水灌溉理论与技术。E-mail: chensiyi2012@sina.com。

通讯作者:胡田田(1966—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: hutiantian@nwsuaf.edu.cn。

效果上^[1-2],综合考虑灌水量和氮、磷、钾肥用量四个因素的研究尚鲜见报道。

根系分区交替灌溉 (APRI) 是近年来针对世界范围内水资源日益紧缺与水分利用效率较低这一矛盾而提出的一种新的节水灌溉方法与技术^[3]。目前关于根系分区交替灌溉对作物生长生理特性及产量与品质的研究很多^[4],关于局部灌溉条件下水肥供应对农作物产量的影响方面也有报道^[5]。然而,截至目前,关于根系分区交替灌溉条件下水肥用量对农产品品质的影响方面,尚少见报道。为此,本文在分根区交替灌溉条件下,应用四元二次正交旋转组合设计,研究不同灌水量和氮、磷、钾肥施用量对番茄果实有机酸含量的影响,通过回归分析、单因素效应与交互效应分析,定量研究番茄果实有机酸含量对水肥因子的响应关系,以期为根系分区交替灌溉条件下番茄的优质生产提供理论与现实依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验于 2011 年 5—9 月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。供试土壤取自西北农林科技大学节水灌溉试验站大田 0~20 cm 耕层土壤。土壤基本理化性状为,田间持水量为 24%,有机质 6.49 g·kg⁻¹,全氮 0.78 g·kg⁻¹,全磷 0.39 g·kg⁻¹,全钾 10.9 g·kg⁻¹,碱解氮 10.08 mg·kg⁻¹,速效磷 4.11 mg·kg⁻¹,速效钾 98.20 mg·kg⁻¹。供试番茄为金鹏 1 号。

试验采用自制分根装置,高 30 cm、直径 30 cm 的铁皮桶中间用带 V 形缺口、高 24 cm 的隔板将桶分为相等的两部分。桶底部装河沙 1 kg,装土 21 kg,装土容重 1.15 g·cm⁻³。两边分别安装一支 PVC 管用于灌水(长 30 cm,直径 2.5 cm)。灌水管外层用孔径为 1 mm 的纱网缠绕两层,共打 3 排圆孔,PVC 管距桶底部 5 cm。

2011 年 5 月 5 日移栽定植,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。定植后立即浇水至田间持水量。待 8 天的缓苗期过后,5 月 13 日,当土壤含水量降至约 65% 田间持水量(θ_f)时,开始采用根系分区交替灌水,0 水平灌水量为 800 ml,其它灌水处理的灌水量按照表 1 进行计算。7 月 23—28 日采收并进行测定。

1.2 试验方案及实施

试验设灌水量、施氮量、施磷量和施钾量 4 个因素,各因素具体的上下水平及变化间距列于表 1,采用四元二次正交旋转组合设计的 1/2 实施方案,共

23 个处理(见表 2),3 次重复。

表 1 试验因子水平编码表
Table 1 Codes and levels of experimental factors

因子 Factors	变量设计水平及编码 Variable levels and their codes				
	- 1.682	- 1	0	1	1.682
灌水量 X_1 Irrigation amount	0.33W	0.60W	W	1.40W	1.67W
施氮量 X_2 N amount/(g·kg ⁻¹)	0	0.19	0.48	0.77	0.96
施磷量 X_3 P amount/(g·kg ⁻¹)	0	0.107	0.264	0.421	0.528
施钾量 X_4 K amount/(g·kg ⁻¹)	0	0.17	0.42	0.67	0.84

注:W 为零水平的灌水量(mL)。
Note: W means the irrigation amount at 0 level.

表 2 试验方案
Table 2 Experimental design

处理号 Treatments	灌水量 Irrigation amount	纯 N 用量 N fertilizer rate	P ₂ O ₅ 用量 P fertilizer rate	K ₂ O 用量 K fertilizer rate
1	1(1.40W)	1(0.77)	1(0.421)	1(0.67)
2	1(1.40W)	1(0.77)	- 1(0.107)	- 1(0.17)
3	1(1.40W)	- 1(0.19)	1(0.421)	- 1(0.17)
4	1(1.40W)	- 1(0.19)	- 1(0.107)	1(0.67)
5	- 1(0.60W)	1(0.77)	1(0.421)	- 1(0.17)
6	- 1(0.60W)	1(0.77)	- 1(0.107)	1(0.67)
7	- 1(0.60W)	- 1(0.19)	1(0.421)	1(0.67)
8	- 1(0.60W)	- 1(0.19)	- 1(0.107)	- 1(0.17)
9	1.682 (1.67W)	0(0.48)	0(0.264)	0(0.42)
10	- 1.682 (0.33W)	0(0.48)	0(0.264)	0(0.42)
11	0(W)	1.682(0.96)	0(0.264)	0(0.42)
12	0(W)	- 1.682(0)	0(0.264)	0(0.42)
13	0(W)	0(0.48)	1.682(0.528)	0(0.42)
14	0(W)	0(0.48)	- 1.682(0)	0(0.42)
15	0(W)	0(0.48)	0(0.264)	1.682(0.84)
16	0(W)	0(0.48)	0(0.264)	- 1.682(0)
17	0(W)	0(0.48)	0(0.264)	0(0.42)
18	0(W)	0(0.48)	0(0.264)	0(0.42)
19	0(W)	0(0.48)	0(0.264)	0(0.42)
20	0(W)	0(0.48)	0(0.264)	0(0.42)
21	0(W)	0(0.48)	0(0.264)	0(0.42)
22	0(W)	0(0.48)	0(0.264)	0(0.42)
23	0(W)	0(0.48)	0(0.264)	0(0.42)

注:括号里的数字为实际用量,括弧外为编码值。
Note: The data inside brackets are actual amount, while those outside brackets are coding values.

试验采用恒重法灌水。当 0 水平灌水处理的土

壤含水量接近灌水下限(田间持水量的 65%)时进行灌水,0 水平灌水量是对 0 水平由 65% θ_f 灌至 85% θ_f 所需水量,其他水平的灌水量根据 0 水平按表 1 的设计水平进行计算。每次只灌其中一边,两边轮流灌水,各处理灌水时间相同。灌水周期根据 0 水平处理的土壤含水量确定,一般为 2~3 d 1 次,整个生育期共灌水 41 次,各灌水水平处理的累积灌溉量从小到大依次为: 6. 963、12. 673、21. 098、29. 523、35. 233 L。

试验用氮、磷、钾肥料分别为尿素(含 N 46%),过磷酸钙(含 P_2O_5 15%)和硫酸钾(含 K_2O 50%)。磷肥一次性基施。氮肥和钾肥按照基追比 1:2 施用,追肥分别在第一穗果膨大期和第二穗果膨大期进行,两侧根系的追肥量相等,两侧根区追肥分前后两次进行,肥料随当次灌水施入土壤。

1.3 测定项目及方法

番茄有机酸含量采用酸碱滴定法测定。土壤基本理化性状采用常规方法。

1.4 数据处理

试验数据用 DPS 软件进行方程拟合,用 Excel 及 Matlab 软件对分析结果进行图表的绘制。

2 结果与分析

2.1 番茄有机酸含量与灌水量以及氮、磷、钾肥用量间回归模型的建立

以四元二次多项式拟合灌水量、施氮量、施磷量及施钾量四个水肥因子 X_i 与番茄有机酸含量 Y 的关系,对方程进行方差分析,得到最终的简化模型如下:

$$Y = 7.7 - 0.3X_1 + 0.6X_2 + 0.2X_3 - 0.1X_3^2 - 0.4X_4^2 + 0.2X_1X_4 + 0.2X_2X_3 \quad (1)$$

方差分析表明,模型的 $F_{\text{回}} = 6.567 > F_{0.01}(10, 12) = 4.296$,说明水肥用量与番茄有机酸含量的回归关系达到极显著水平,能反映番茄果实中有机酸的变化情况。

根据方差分析的结果,上述方程中各项回归系数的 F 值依次为 $F_1 = 8.105, F_2 = 31.908, F_3 = 2.361, F_{33} = 2.042, F_{44} = 12.763, F_{14} = 2.936, F_{23} = 2.936 (F_{0.25}(1, 12) = 1.461; F_{0.1}(1, 12) = 3.177; F_{0.05}(1, 12) = 4.747; F_{0.01}(1, 12) = 9.330)$ 。可见,一次项 X_2 及二次项 X_4^2 达到极显著水平, X_1 达到显著水平,其它项均达 0.25 显著性水平。表明在试验条件下,灌水量、施氮量与施钾量对番茄有机酸积累作用较大,施磷量对番茄有机酸含量也有一定影响;在交互项中,灌水量与施钾量、施氮量与施磷量间对

番茄有机酸含量有一定的交互作用。

2.2 单一因素对番茄果实有机酸含量的影响

由于试验设计满足了正交性,模型中各项偏回归系数彼此独立,因此可对模型进行降维处理,即固定其它因素为 0 水平,得到各因素对于番茄有机酸含量的一元二次偏回归子模型,绘制各单因子与有机酸含量的关系,见图 1。

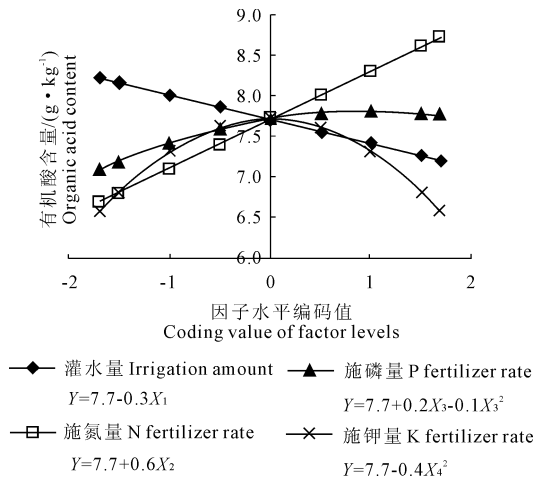


图 1 单一因子与番茄有机酸含量的关系

Fig. 1 Relationship between single factor and organic acid content in tomato

注: X_1, X_2, X_3, X_4 分别表示灌水量、施氮量、施磷量与施钾量。

Note: X_1, X_2, X_3 and X_4 denote irrigation amount, N fertilizer rate, P fertilizer rate and K fertilizer rate, respectively.

由图 1 可知,番茄有机酸含量随灌水量增加逐渐减小,相对较低的灌水量有利于有机酸的积累;与此相反,有机酸含量随施氮量增加逐渐增加,氮肥一次项系数为 0.6,达极显著水平,说明增大氮肥的施用量,能显著增大番茄有机酸含量;有机酸含量随施磷量、施钾量增加呈开口向下的抛物线变化,最高有机酸含量的施磷量与施钾量分别在其因子编码值为 1、0 时达到。可见,番茄有机酸含量与灌水量以及氮、磷、钾肥用量均有密切关系。

2.3 两因素对番茄有机酸含量的耦合效应

有机酸含量受到多因素的影响,任何单因素的影响都不是孤立存在的,在多因素试验中,只有对因子间的交互作用进行分析才能揭示事物本身内在的联系。在本试验中,交互项 X_1X_4 和 X_2X_3 比较显著。降维法处理后可以得到如下子模型:

$$Y(X_1, X_4) = 7.7 - 0.3X_1 - 0.4X_4^2 + 0.2X_1X_4 \quad (2)$$

$$Y(X_2, X_3) = 7.7 + 0.6X_2 + 0.2X_3 - 0.1X_3^2 + 0.2X_2X_3 \quad (3)$$

2.3.1 灌水量与施钾量对有机酸含量的耦合效应
由耦合效应子模型(2)可知,灌水量与施钾量的

交互项系数为 +0.2,即二者相互作用会协同促进有机酸含量的提高。由图 2 可知,不论灌水量高低,随着施钾量的增加,番茄有机酸含量均表现为先增加后减小的趋势,且有机酸含量最大值均在施钾量为中水平(0.42 g·kg⁻¹)时达到。当施钾量低于最高水平时,有机酸含量随灌水量增加而逐渐降低;施钾量为最高水平时有机酸含量随灌水量增加而提高,但变化幅度很小。当灌水量处于最低水平(0.33 W)、施钾量为中水平时,有机酸含量达到最大值 8.2 g·kg⁻¹;在灌水量为最大、施钾量为最小(0 g·kg⁻¹)时达到最小值 5.5 g·kg⁻¹,比最高值降低了 32.93%。可见,适当减少灌水量并合理配施钾肥会促使番茄有机酸含量增大,增大灌水量同时减小钾肥施用可以减小有机酸含量。

2.3.2 施氮量与施磷量对有机酸含量的耦合效应

施氮量与施磷量的交互项系数为 +0.2,说明二者相互作用协同促进番茄有机酸含量的提高。根据模型(3)可以计算出施氮量与施磷量对番茄有机酸含量的耦合效应(见表 3)。由表 3 可知,不论施磷量如何变化,随着施氮量的增加番茄有机酸含量逐渐增加,其增幅随施磷量增加而增大,以施磷量处于高水

平时的增幅最大,可达 50%。番茄有机酸随施磷量变化的规律有所不同:在施氮量低于 0 水平(0.48 g·kg⁻¹)时,有机酸含量随施磷量先增加后减小;当施氮量大于等于 0 水平时,随施磷量增加有机酸含量逐渐增大。有机酸含量的最大值在施氮量与施磷量皆处于最高水平时达到,其最大值为 9.3 g·kg⁻¹。综合看来,施磷量对有机酸含量的影响小于施氮量,随氮、磷肥用量的增加有机酸含量逐渐增大。

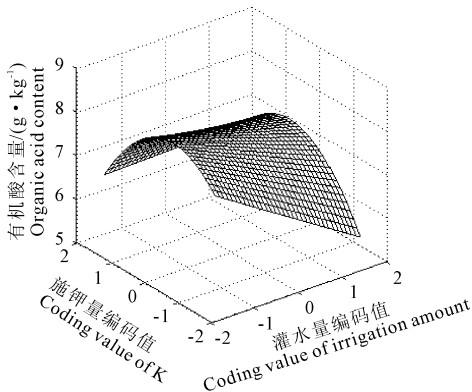


图 2 灌水量与施钾量对有机酸含量的影响

Fig.2 Effect of irrigation amount and K fertilizer rate on organic acid content in tomato

表 3 施氮量与施磷量的耦合效应/(g·kg⁻¹)

Table 3 Coupling effect between N and P fertilizer rate

施氮量 N fertilizer rate	施磷量 P fertilizer rate				统计参数 Statistical parameter			
	- 1.682	- 1	0	1	- 1.682	$\bar{X}$	S	CV/%
- 1.682	6.6	6.7	6.7	6.5	6.2	6.5	0.2	3.47
- 1	6.8	7.0	7.1	7.0	6.8	6.9	0.1	1.80
0	7.1	7.4	7.7	7.8	7.8	7.5	0.3	4.03
1	7.3	7.8	8.3	8.6	8.7	8.1	0.6	6.97
1.682	7.5	8.1	8.7	9.1	9.3	8.6	0.8	8.80
统计参数 Statistical parameter	$\bar{X}$	7.1	7.4	7.7	7.8			
	S	0.4	0.6	0.8	1.1	1.3		
	CV/%	5.15	7.48	10.78	14.19	16.71		

3 讨 论

最佳风味的形成需要较高的糖度和相对较高的酸度,低糖和高酸会形成酸果,高糖和低酸则会令味道变淡,而低糖和低酸会降低果实口感。

均匀灌水条件下的研究表明,适度水分亏缺会提高番茄果实中有机酸的积累^[6-7]。本研究表明,根系分区交替灌溉条件下,随着灌水水平的提高有机酸含量逐渐下降,这与均匀灌水条件下的研究结果一致;此外,在灌水量与施钾量的耦合效应分析中,除施钾量处于最高水平外,有机酸含量都随灌水

量增加而减小。可见,较高的灌水量不利于果实有机酸含量的积累。

在本试验条件下,单因素与耦合效应分析一致表明,提高氮肥用量能显著提高有机酸含量,这与谢安坤^[8]在均匀灌溉条件下的研究结论一致。这可能与氮肥提高了有机酸代谢关键酶——磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶(PEPCase)的活性^[9]有关。此外,氮磷的配施也可以有效促进有机酸含量的提高,随着施氮量的增加有机酸含量逐渐增加,其增幅随施磷量增大而增大。也有均匀灌溉条件下的研究表明,随着铵态氮含量增加,番茄果实总酸不变^[10],这可能与

不同研究所控制的施氮量、供试土壤肥力和采用的作物品种等条件不同有关。

本研究表明,有机酸含量随施磷量增加呈开口向下抛物线型变化,均匀灌溉条件下的研究表明,少量施磷可促进有机酸的形成,但当超过中等施磷水平时,果实中有机酸的含量迅速下降。同时,董洁等^[11]研究认为随着施磷量的增加番茄果实中有机酸含量也相应增加,在氮磷耦合效应分析中,随着施磷量增加,有机酸含量平均值有所增加,施磷量与施氮量的交互效应为正效应。

施钾量的单因素与耦合效应分析一致表明,有机酸含量随施钾量增加呈开口向下抛物线型变化,可见随着施钾量增加有机酸含量先增加,随后其含量会逐渐降低,均匀灌水条件下的研究表明,施钾会增加果实有机酸含量^[11]。同时也有研究表明,果实有机酸含量随施钾量增加而降低^[12],这可能是因为不同试验中所控制的钾肥施用量有差别或是其他试验条件不同,有关施钾量对于番茄果实有机酸含量的影响还有待进一步研究。

4 结 论

本研究通过分根法,采用盆栽试验,以四元二次正交旋转组合设计,研究了根系分区交替灌水条件下灌水量和氮、磷及钾肥用量 4 个因子对番茄果实有机酸含量的影响,获得如下主要结果:

1) 在本试验条件下,灌水量对番茄有机酸含量的影响为负效应,氮与磷均表现出正效应,表明灌水量过高不利于有机酸含量的增加,合理增施氮磷肥可有效提高果实有机酸含量。

2) 灌水量与施钾量、施氮量与施磷量的交互作用为正效应,会协同促进番茄有机酸的积累。由耦

合效应分析可知,增施氮磷肥会显著提高果实有机酸含量,合理施用钾肥、减小灌水量也促使有机酸含量提高。

参 考 文 献:

[1] Kannan P, Saravanan A, Balaji T. Organic farming on tomato yield and quality[J]. Crop Research (Hisar), 2006,32(2):196-200.

[2] Kadam J R, Sahane J S. Quality parameters and growth characters of tomato as influenced by NPK fertilizer briquette and irrigation methods [J]. Journal of Maharashtra Agricultural Universities, 2002,27(2): 124-126.

[3] 康绍忠,张建华,梁宗锁,等.控制性交替灌溉——一种新的农田节水调控思路[J].干旱地区农业研究,1997,15(1):1-6.

[4] Wakrim R, Wahbi S, Tahi H. 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.

[5] 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.

[6] Zushi K, Matsuzoe N. Effect of soil water deficit on Vitamin C, sugar, organic acid, amino acid and cartene contents of large-fruited tomatoes[J]. Japan Soc. Hort. Sci., 1998,67(6):927-933.

[7] 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.

[8] 谢安坤,李志宏,张云贵,等.不同施氮水平对番茄产量、品质及土壤剖面硝态氮的影响[J].中国土壤与肥料,2011,(1):26-29.

[9] 董彩霞,徐新娟,卢颖林,等.不同形态氮素调控番茄果实和叶片内有机酸代谢的研究进展[J].南京农业大学学报,2009,32(3):139-145.

[10] 杨月英,张福漫,乔晓军.不同形态氮素对基质培番茄生育、产量及品质的影响[J].华北农学报,2003,18(1):86-89.

[11] 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.

[12] 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.