

网络出版时间:2017-10-09 09:39

DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2017.11.009

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20171009.0939.018.html>

基于旋转设计的番茄果实可滴定酸含量对土壤水分的响应

冯璞玉, 陈 思, 周振江, 胡田田

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

【摘要】【目的】探究不同生育阶段土壤含水率对番茄果实可滴定酸含量的影响,为番茄生育期精确灌溉及优质生产提供参考。【方法】根据番茄的生长发育规律并结合第 1 穗果的发育动态,将番茄全生育期划分为苗期、始花结果期、果实生长初期、快速膨大期和品质形成期 5 个阶段,各阶段均设置 5 个不同的土壤含水率(12.0%~14.4%, 14.4%~16.8%, 16.8%~19.2%, 19.2%~21.6%, 21.6%~24.0%)进行水分控制,采用五元二次通用旋转组合设计进行盆栽试验,用 NaOH 滴定法测定番茄果实可滴定酸含量,建立果实可滴定酸含量与不同阶段土壤含水率的数学模型,并进行因子主效应、单因子效应、耦合效应分析及模型寻优。【结果】在快速膨大期进行土壤水分调控对番茄果实可滴定酸含量影响最大,品质形成期土壤水分调控的影响次之,苗期土壤水分调控的影响最小。其他生长阶段土壤含水率控制在 16.8%~19.2%时,番茄果实可滴定酸含量随始花结果期、果实生长初期和快速膨大期土壤含水率增加呈先降低后升高趋势,随品质形成期土壤含水率增加呈开口向下的抛物线型变化,但不受苗期土壤含水率变化的影响。耦合效应分析表明,品质形成期与苗期、始花结果期土壤含水率对番茄可滴定酸的积累有正交互作用;苗期和始花结果期与果实生长初期、快速膨大期土壤含水率之间,以及快速膨大期与品质形成期土壤含水率之间有负交互作用。【结论】番茄苗期、始花结果期、果实生长初期、快速膨大期和品质形成期土壤含水率依次控制在 18.6%~19.1%, 18.8%~19.3%, 18.5%~19.0%, 18.7%~19.2% 和 18.4%~18.9% 时,番茄可以获得较高的可滴定酸含量。

【关键词】 番茄;可滴定酸;土壤含水率;生育阶段

【中图分类号】 S641.207⁺.1

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2017)11-0067-09

Effect of soil water content on titratable acid content in tomato fruits based on rotatable design

FENG Puyu, CHEN Si, ZHOU Zhenjiang, HU Tiantian

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas of Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract:【Objective】The effect of soil water content on titratable acid content of tomato fruit was studied to provide reference for precision irrigation and high quality production.【Method】In this study, according to the growth of tomato and the development dynamic of the first spike fruits, tomato growth was divided into five stages, i. e. vegetative growth stage, blooming and fruit setting stage, early fruit growth stage, fruit development stage and fruit maturity stage. Each stage had five different soil moisture content levels (12.0%—14.4%, 14.4%—16.8%, 16.8%—19.2%, 19.2%—21.6%, and 21.6%—24.0%). Quadratic general composite rotatable design method with five factors was used. Titratable acid content was de-

【收稿日期】 2016-10-14

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

【作者简介】 冯璞玉(1990—),男,河北唐山人,硕士,主要从事农业节水理论与技术研究。

【通信作者】 胡田田(1966—),女,陕西礼泉人,教授,主要从事农业节水理论与技术研究。E-mail: hutiantian@nwsuaf.edu.cn

terminated with NaOH titration. A regression model on titratable acid in tomato fruits and soil water content at different growth stages was established. Main effects, single and coupling effects were analyzed and the model was optimized. 【Result】 Soil moisture regulation at fruit development stage had the biggest impact on titratable acid content followed by fruit maturity stage, while soil moisture regulation at vegetative growth stage had the least impact. Starting from 16.8%—19.2%, the titratable acid content decreased firstly and then increased with the increase of soil water content at blooming and fruit setting stage, early fruit growth stage, and fruit development stage. It showed a reverse trend with the increase of soil water content at fruit maturity stage but it was not affected by soil water content at vegetative growth stage. Coupling effect analysis shows that the interactions between soil water contents at fruit maturity stage and vegetative growth stage, as well as fruit maturity stage and blooming and fruit setting stage showed positive effects on titratable acid content in tomato fruits. The interactions between the soil water contents at vegetative growth stage and early fruit growth stage or fruit development stage were negative. The interactions between soil water contents at blooming and fruit setting stage and early fruit growth stage or fruit development stage as well as fruit development stage and fruit maturity stage were also negative. 【Conclusion】 High titratable acid content could be obtained if soil water contents are controlled at 18.6%—19.1%, 18.8%—19.3%, 18.5%—19.0%, 18.7%—19.2% and 18.4%—18.9% for vegetative growth stage, blooming and fruit setting stage, early fruit growth stage, fruit development stage and fruit maturity stage, respectively.

Key words: tomato; titratable acid; soil water content; growth stage

随着我国设施蔬菜产业的发展,蔬菜的供应量已经基本满足了市场需求,今后相当长一段时期内,蔬菜生产的目标将由过去单纯重视产量和品种多样性,逐步转向重视蔬菜的营养价值和无公害生产^[1]。苹果酸和柠檬酸等可滴定酸是番茄重要的风味品质性状之一,有增加胃液酸度、帮助消化、调整胃肠功能的作用,其含量高低对番茄果实的风味以及营养价值都有重要影响^[2],且较高的可滴定酸含量有利于果实的保存^[3]。

番茄植株对土壤水分变化比较敏感,其果实品质与土壤水分状况密切相关^[4]。刘明池等^[5]研究了亏缺灌溉对番茄品质的影响,表明在 75% 的正常灌水量下,水分亏缺提高了温室番茄果实的可滴定酸含量,且水分亏缺开始时间越早,番茄果实可滴定酸含量越高。番茄在各生育阶段的需水量差异较大,不同生育阶段的土壤水分状况对果实品质会产生不同程度的影响^[6]。单一时期土壤水分调控的研究表明,苗期土壤水分调控对温室番茄果实可滴定酸含量无明显影响,开花坐果期和成熟采摘期土壤水分调控对番茄果实可滴定酸含量影响显著,且均在土壤水分下限控制在 50% 田间持水量时达到最大^[7]。但也有研究表明,开花期水分亏缺对番茄果实可滴定酸含量并无显著影响^[8]。

目前关于番茄不同阶段水分调控的研究,多将

其生育期划分为苗期、开花结果期和成熟采摘期,对其生长发育阶段进一步细分的研究尚未见报道。番茄果实生长发育过程可划分为坐果初期的慢速生长阶段、果实快速膨大阶段和品质形成阶段 3 个阶段,其中果实快速膨大阶段番茄果实生长速率快、变化大^[8],而品质形成阶段又是番茄品质形成的关键时期^[9],为此可将番茄生长发育过程细分为苗期、始花结果期、果实生长初期、快速膨大期和品质形成期。在进行多因素多水平试验时,相比于全试验设计,应用旋转组合设计可以大大减少试验处理数目,且结果充分,因此该设计是较为理想的选择^[10]。本试验即应用五元二次通用旋转组合设计,研究 5 个不同生育阶段土壤含水率对番茄果实可滴定酸含量的影响,并通过因子主效应、单因子效应与耦合效应分析等,定量研究番茄果实可滴定酸含量对各生育阶段土壤含水率的响应关系,以为番茄的优质生产提供理论依据与技术参数。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验于 2012 年 3—7 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。供试番茄品种为“农城种业 906”。试验用桶底部内径 25 cm,顶部内径 30 cm,高 30 cm。每桶装风干土(土壤含

水率为 4%) 21 kg, 装土的体积质量为 1.3 g/cm³。每桶安装 2 个 PVC 管(长 25 cm, 直径 2.5 cm) 用于灌水, 每管均打 3 排圆孔, 管外层用 1 mm 孔径纱网缠绕防止堵塞。供试土壤取自当地农田 0~20 cm 耕层土壤, 田间持水量为 24% (θ_f , 质量分数), 土壤有机质 16.09 g/kg, 全氮 0.85 g/kg, 有效磷 28.08 mg/kg, 有效钾 83.40 mg/kg。

1.2 试验设计

根据番茄的生长规律并结合第 1 穗果的发育情况, 将番茄全生育期划分为 5 个阶段, 即苗期(缓苗后至第 1 穗现蕾)、始花结果期(现蕾至坐果)、果实生长初期(坐果至果实直径约 4 cm)、快速膨大期(果实直径约 4 cm 至果实发白)、品质形成期(果实发白至成熟采摘), 用 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、 θ_4 、 θ_5 分别代表这 5 个阶段的土壤含水率, 为了将其应用于二次通用旋

转组合设计中, 需要将其转换成无量纲的编码值^[11] X_i ($i=1\sim 5$, $-2\leq X_i\leq 2$), 二者对应关系为:

$$X_i = \frac{\theta_i - \theta_{0i}}{\Delta\theta_i} \quad (1)$$

式中: X_i 为第 i 阶段土壤含水率的编码值; θ_i 为第 i 阶段土壤含水率实际值; θ_{0i} 为第 i 阶段土壤含水率的中间水平, 本试验中为 19.2%; $\Delta\theta_i$ 为第 i 阶段土壤含水率的变化间距, 本试验中各阶段的 $\Delta\theta_i$ 均为 2.4%。每个阶段土壤含水率均设 5 个水平, 依次为 14.4%, 16.8%, 19.2%, 21.6% 和 24.0%。试验过程中, 给每个水平对应的土壤含水率均设置 2.4% 的弹性范围, 即 5 个水平依次为 12.0%~14.4%, 14.4%~16.8%, 16.8%~19.2%, 19.2%~21.6% 和 21.6%~24.0%, 以方便试验进行。综上, 可以得到试验因素实际水平与编码值的对应关系如表 1 所示。

表 1 二次通用旋转组合试验因素水平编码表

Table 1 Codes and levels of quadratic general composite rotatable experiment factors

试验因素 Experimental factor	水平和编码值 Level and code					变化间距 Interval
	-2	-1	0	1	2	
X_1	12.0~14.4	14.4~16.8	16.8~19.2	19.2~21.6	21.6~24.0	2.4
X_2	12.0~14.4	14.4~16.8	16.8~19.2	19.2~21.6	21.6~24.0	2.4
X_3	12.0~14.4	14.4~16.8	16.8~19.2	19.2~21.6	21.6~24.0	2.4
X_4	12.0~14.4	14.4~16.8	16.8~19.2	19.2~21.6	21.6~24.0	2.4
X_5	12.0~14.4	14.4~16.8	16.8~19.2	19.2~21.6	21.6~24.0	2.4

注: X_1 为苗期土壤含水率; X_2 为始花结果期土壤含水率; X_3 为果实生长初期土壤含水率; X_4 为快速膨大期土壤含水率; X_5 为品质形成期土壤含水率。

Note: X_1 . Soil water content at vegetative growth stage; X_2 . Soil water content at blooming and fruit setting stage; X_3 . Soil water content at early fruit growth stage; X_4 . Soil water content at fruit development stage; X_5 . Soil water content at fruit maturity stage.

采用五元二次通用旋转组合设计(进行 1/2 实施, 即在满足统计分析要求的前提下选择全部处理的一半进行试验^[11]; 因子数 $k=5$, 星号臂 $\gamma=2$), 以 5 个生育阶段的土壤含水率为试验因素, 因子试验点 $16(2^{k-1})$ 个, $\pm\gamma$ 水平试验点 $10(2k)$ 个, 0 水平试验点 6 个, 共 32 个处理^[12], 重复 3 次, 随机区组排列。

试验采用称质量法控制土壤水分, 根据称得的总质量、桶质量、风干土质量、风干土含水率、植株质量即可计算当前土壤的含水率。根据试验方案要求, 番茄果实生长发育至不同阶段时, 采取不同的土壤水分控制水平(表 1 展示了各阶段各控制水平的上限和下限)。当土壤水分降至控制水平的下限时进行灌水, 并灌水至控制水平的上限, 其灌水周期取决于土壤含水率的变化情况, 一般为 2~3 d 灌水 1 次。处理开始后, 每 21 d 采收各处理的番茄 1 株, 称整株质量, 用以校对植株生长的影响, 试验周期内共校对 2 次。2012 年 3 月 10 日育苗, 4 月 15 日移

栽定植, 定植后立即浇水至田间持水量进行缓苗, 缓苗结束后开始灌水处理。5 月 16 日打顶, 每株留 2 穗果, 6 月 20 日至 7 月 10 日采收第 1 穗果并进行测定。试验所用肥料: 过磷酸钙(含 P_2O_5 为 14.0%)、尿素(含 N 为 46.4%)、硫酸钾(含 K_2O 为 50%) 和有机肥(氨基酸 $\geq 10\%$, 氮磷钾 $\geq 4\%$, 有机质 $\geq 30\%$, 蛋白质 $\geq 8\%$)。磷肥和有机肥一次性基施, 氮肥和钾肥按基追比 1:2 施用, 追肥在第 1 穗果和第 2 穗果膨大期进行。追肥随灌水施入, 其他管理同大田生产, 即定期喷洒农药和叶面肥。

1.3 测定项目及方法

试验中番茄可滴定酸含量采用 NaOH 滴定法^[13]测定。

1.4 数据处理

采用统计软件 DPS 3.01 对试验结果进行分析, 并建立数学模型; 用 SigmaPlot 10.0 和 Matlab 7.0 软件, 对分析结果进行绘图。

2 结果与分析

采用 DPS 3.01 统计软件中五元二次通用旋转组合设计的分析程序,对 32 个处理的番茄果实可滴定酸含量的测定结果(表 2)进行二次回归拟合,可以得到 5 个阶段土壤含水率编码值 X_i 与可滴定酸含量 Y 的关系方程,对方程进行方差分析(显著性水平 α 定为 0.25,剔除 P 值大于 0.25 的项)后,最终得到简化模型为:

$$Y=0.690+0.012X_2-0.027X_3-0.036X_4+0.016X_2^2+0.018X_3^2+0.014X_4^2-0.019X_5^2-0.024X_1X_3-0.031X_1X_4+0.032X_1X_5-0.018X_2X_3-0.042X_2X_4+0.036X_2X_5-0.023X_4X_5. \quad (2)$$

方差分析表明,模型 $P=0.0017$,能反映番茄果实可滴定酸含量随各阶段土壤含水率的变化情况。

表 2 番茄果实可滴定酸含量的测定结果

Table 2 Titratable acid content in tomato fruits

mg/g

处理 Treatments	可滴定酸含量 Titratable acid content	处理 Treatments	可滴定酸含量 Titratable acid content	处理 Treatments	可滴定酸含量 Titratable acid content
1	0.606±0.030	12	0.771±0.127	23	0.798±0.065
2	0.720±0.093	13	0.659±0.063	24	0.687±0.067
3	0.653±0.026	14	0.750±0.033	25	0.570±0.088
4	1.005±0.042	15	0.807±0.093	26	0.648±0.025
5	0.710±0.088	16	0.595±0.023	27	0.744±0.100
6	0.715±0.054	17	0.704±0.062	28	0.718±0.046
7	0.667±0.039	18	0.659±0.051	29	0.714±0.049
8	0.764±0.044	19	0.729±0.085	30	0.691±0.086
9	0.698±0.112	20	0.771±0.053	31	0.664±0.073
10	0.762±0.048	21	0.849±0.102	32	0.620±0.076
11	0.648±0.074	22	0.663±0.066		

2.1 影响番茄果实可滴定酸含量的因子主效应

因子的重要性主要通过该因子对目标函数影响的大小,也就是某一因子引起目标函数变化幅度的大小来反映。王小勇^[14]提出“函数变幅”概念,即固

定其他因子,计算得到某一因子取不同水平时函数值的标准差,其值大小可衡量该因子对目标函数的相对重要程度。表 3 为式(2)模型分别固定在一、-1、0、1、2 等不同水平下各因子的函数变幅值。

表 3 不同水平下各因子的函数变幅及位次排列

Table 3 Function variation and ranking of factors at different levels

编码值 Level of factor	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	因子位次 Rank of factors
-2	0.073	0.091	0.092	0.248	0.147	$X_4 > X_5 > X_3 > X_2 > X_1$
-1	0.036	0.061	0.040	0.098	0.076	$X_4 > X_5 > X_2 > X_3 > X_1$
0	0	0.035	0.052	0.063	0.035	$X_4 > X_3 > X_5 \approx X_2 > X_1$
1	0.036	0.035	0.110	0.210	0.076	$X_4 > X_3 > X_5 > X_1 > X_2$
2	0.073	0.061	0.179	0.361	0.147	$X_4 > X_3 > X_5 > X_1 > X_2$
平均变幅 Average amplitude	0.044	0.057	0.095	0.196	0.096	$X_4 > X_5 > X_3 > X_2 > X_1$

表 3 表明,不论其他阶段土壤含水率如何变化,快速膨大期的土壤含水率始终对番茄果实可滴定酸含量影响最大。从平均变幅可以看出,其他阶段土

壤含水率表现为 $X_5 > X_3 > X_2 > X_1$,说明品质形成期土壤含水率对可滴定酸含量的影响仅次于快速膨大期,而苗期影响最小。另外,在其他因子为一、

-1 水平时表现为 $X_5 > X_3 > X_1$,而在 0、1、2 水平下为 $X_3 > X_5 > X_1$,表明品质形成期和果实生长初期土壤含水率影响的相对大小与其他阶段土壤含水率有关:在其他阶段土壤含水率较低时,品质形成期土壤含水率影响较大;相反,其他阶段土壤含水率较高时,果实生长初期土壤含水率影响较大。

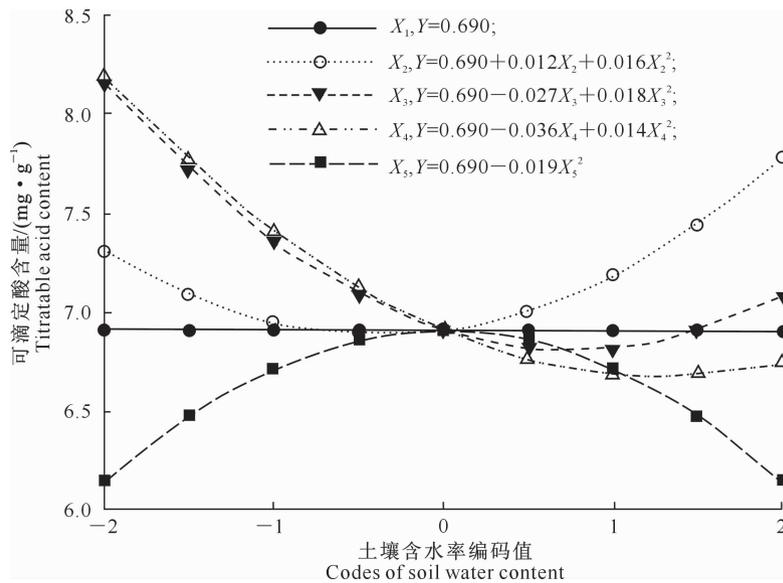


图 1 各生育阶段土壤含水率对番茄果实中可滴定酸含量的影响

Fig. 1 Effects of soil water contents on titratable acid content at different growth stages

从图 1 可以看到,番茄果实中可滴定酸含量不受苗期土壤含水率的影响。对于始花结果期,可滴定酸含量随土壤含水率的增加呈现先降低后升高的趋势,土壤含水率为 21.6%~24.0%时,可滴定酸含量最高,为 7.78 mg/g。果实生长初期和快速膨大期土壤含水率对可滴定酸含量的影响类似,当土壤含水率由 12.0%~14.4%增加至 19.2%~21.6%时,可滴定酸含量随之降低;当土壤含水率超过 19.2%~21.6%后,可滴定酸含量开始逐渐升高;可滴定酸含量最大值均在土壤含水率最小时(即 12.0%~14.4%)出现,分别为 8.16 和 8.18 mg/g,说明在果实生长初期和快速膨大期适当减少灌水量有利于果实中可滴定酸的累积。可滴定酸含量随品质形成期土壤含水率提高呈开口向上的抛物线变化,最大值在土壤含水率为 16.8%~19.2%时产生,为 6.9 mg/g;当品质形成期土壤含水率低于 16.8%~19.2%时,可滴定酸含量随含水率增大而逐渐升高;在含水率高于 16.8%~19.2%后,又随之逐渐降低,说明在品质形成期应注意水分的合理用量,过多或过少均不利于番茄果实可滴定酸的积累。

2.2 影响番茄果实可滴定酸含量的单因子效应

为进一步探讨各生育阶段土壤含水率对番茄果实可滴定酸含量的影响规律,运用降维分析法,即令其他因子处于 0 水平,可以得到单个因子与可滴定酸含量之间的一元二次偏回归子模型如图 1 所示。

2.3 影响番茄果实可滴定酸含量的两因子耦合效应

番茄果实可滴定酸含量受到多因素的影响,在本试验中,共有 10 个交互项因素,其中达到 0.25 显著水平的交互项因素有 X_1X_3 、 X_1X_4 、 X_1X_5 、 X_2X_3 、 X_2X_4 、 X_2X_5 、 X_4X_5 。降维法处理后可以得到如下子模型:

$$Y_{1,3} = 0.690 - 0.027X_3 + 0.018X_3^2 - 0.024X_1X_3;$$

$$Y_{1,4} = 0.690 - 0.036X_4 + 0.014X_4^2 - 0.031X_1X_4;$$

$$Y_{1,5} = 0.690 - 0.019X_5^2 + 0.032X_1X_5;$$

$$Y_{2,3} = 0.690 + 0.012X_2 - 0.027X_3 + 0.016X_2^2 + 0.018X_3^2 - 0.018X_2X_3;$$

$$Y_{2,4} = 0.690 + 0.012X_2 - 0.036X_4 + 0.0162X_2^2 + 0.014X_4^2 - 0.042X_2X_4;$$

$$Y_{2,5} = 0.690 + 0.012X_2 + 0.016X_2^2 - 0.019X_5^2 + 0.036X_2X_5;$$

$$Y_{4,5} = 0.690 - 0.036X_4 + 0.014X_4^2 - 0.019X_5^2 - 0.023X_4X_5.$$

上述公式中,交互项系数若为正,则说明二者的交互作用能促进可滴定酸含量的提高;若为负,则二者的交互作用会阻碍可滴定酸含量的提高。由此可

知,苗期与品质形成期及始花结果期与品质形成期土壤含水率有正交互作用,且始花结果期与品质形成期土壤含水率的正交互作用较大,而始花结果期与快速膨大期土壤含水率的负交互作用最大。对各二元方程求最大值可知,因变量均在各自变量取边界值时达到最大,如 $Y_{2,4}$ 在 $X_2=2, X_4=-2$, 即始花结果期和快速膨大期土壤含水率分别为(21.6%~24.0%)和(12.0%~14.4%)时,得到可滴定酸最大值,为 10.74 mg/g。

苗期和果实生长初期土壤含水率对番茄果实可滴定酸含量的影响如图 2-a 所示。由图 2-a 可知,苗期土壤含水率在不超 19.2%~21.6% 时,随果实生长初期土壤含水率的增加,果实中可滴定酸含量呈先降低后升高的变化趋势;苗期土壤含水率达到 21.6%~24.0% 时,可滴定酸含量随着果实生长初期土壤含水率增加不断降低。果实生长初期土壤含水率大于 16.8%~19.2% 时,随苗期土壤含水率增加,可滴定酸含量不断降低;果实生长初期土壤含水率小于 16.8%~19.2% 时,可滴定酸含量随苗期土壤含水率增加不断升高,且果实生长初期土壤含水率越高,可滴定酸含量升高越快。

图 2-b 反映的是苗期和快速膨大期土壤含水率对番茄果实可滴定酸含量的影响。图 2-b 显示,苗期土壤含水率控制在(12.0%~14.4%)至(16.8%~19.2%)时,随快速膨大期土壤含水率的增加,果实中可滴定酸含量呈先降低后增加的变化趋势;当苗期土壤含水率不低于 19.2%~21.6% 时,可滴定酸含量随着快速膨大期土壤含水率增加不断降低。

苗期和品质形成期土壤含水率对番茄果实可滴定酸含量的影响如图 2-c 所示。由图 2-c 可见,苗期土壤含水率为 12.0%~14.4% 时,果实中可滴定酸含量随品质形成期土壤含水率的增加而逐渐降低;苗期土壤含水率在(14.4%~16.8%)至(19.2%~21.6%)时,随着品质形成期土壤含水率的增加,可滴定酸含量呈先升高后降低的变化趋势;苗期土壤含水率为 21.6%~24.0% 时,可滴定酸含量随品质形成期土壤含水率的增加而不断升高。

从图 2-d 可以看出,始花结果期和果实生长初期土壤含水率的交互作用为下凹曲面,即当其他因子为“0”水平时,可滴定酸含量随着这两个时期土壤含水率的变化均呈抛物线状变化。

始花结果期和快速膨大期土壤含水率对番茄果实可滴定酸含量的影响如图 2-e 所示,始花结果期

土壤含水率处于(12.0%~14.4%)至(16.8%~19.2%)时,随着快速膨大期土壤含水率的增加,果实可滴定酸含量呈先降低后升高的变化趋势,变化幅度也先减小后增大;始花结果期土壤含水率不低于 19.2%~21.6% 时,可滴定酸含量随着快速膨大期土壤含水率的增加而不断降低,降低幅度不断增大。

从图 2-f 可以看出,当始花结果期土壤含水率处于最低水平(12.0%~14.4%)时,果实中可滴定酸含量随品质形成期土壤含水率的增加而不断降低;在始花结果期土壤含水率不低于 14.4%~16.8% 时,随着品质形成期土壤含水率的增加,番茄果实可滴定酸含量呈先升高后降低趋势。

快速膨大期和品质形成期土壤含水率对番茄果实可滴定酸含量的影响如图 2-g 所示。图 2-g 表明,不论快速膨大期土壤含水率处于何种水平,随着品质形成期土壤含水率的增加,果实中可滴定酸含量均呈先升高后降低趋势,变化幅度先减小后增加。而可滴定酸含量随着快速膨大期土壤含水率的增加呈降低趋势,且品质形成期土壤含水率越低,该降低趋势越明显。

2.4 模型寻优

使用 DPS 统计软件,在步长为“1”的 $-2 \leq X_i \leq 2$ 区间内进行优化模式处理,得出试验条件下可滴定酸含量的最大值为 $Y_{\max} = 1.780$ mg/g,对应的各因素编码值为 $X_1 = 2, X_2 = 2, X_3 = -2, X_4 = -2, X_5 = 2$, 即 5 个生育阶段土壤含水率依次为 21.6%~24.0%, 21.6%~24.0%, 12.0%~14.4%, 12.0%~14.4%, 21.6%~24.0%, 即为理论最优方案。

试验优化的最大可滴定酸含量是计算机模拟的结果,是理论最大值,但要在特定情况下才能实现,若考虑到非控制因素的影响,这个方案较难实现。为了将高含量可滴定酸的方案建立在可靠的基础上,根据所建立的数学模型式(2)可以得到 3 125 个组合方案的可滴定酸含量的理论值,其值为 1.08~17.80 mg/g,其中小于 3.5 mg/g 的组合方案有 35 套,3.5~4.5 mg/g 的方案有 73 套,4.5~5.5 mg/g 的方案有 235 套,5.5~6.5 mg/g 的方案有 510 套,6.5~7.5 mg/g 的方案有 871 套,7.5~8.5 mg/g 的方案有 703 套,8.5~9.5 mg/g 的方案有 334 套,大于 9.5 mg/g 的方案有 364 套。可见,可滴定酸含量为 7.5~8.5 mg/g 方案的分布频率较大,表现较为稳定,符合实际。在可滴定酸含量为 7.5~8.5

mg/g 的 703 套方案中,统计 5 因素各个水平的出现

频次,结果见表 4。

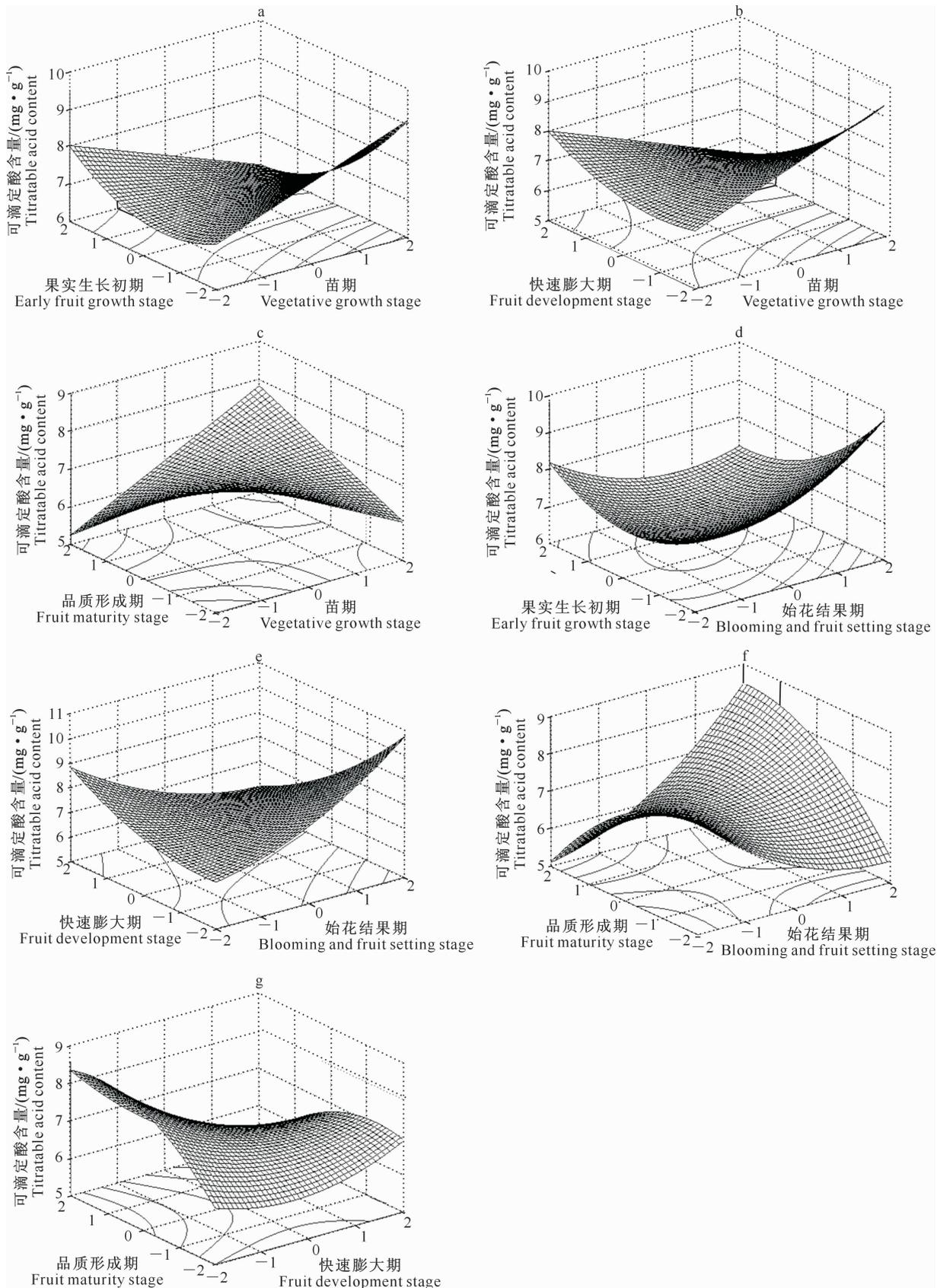


图 2 两因素对番茄果实可滴定酸含量的交互影响

Fig. 2 Effects of two factors on titratable acid of tomato fruits

表 4 可滴定酸含量在 7.5~8.5 mg/g 的 703 套方案中 5 因素各个水平的占比

Table 4 Proportions of 5 factors in 703 plans with titratable acid contents of 7.5–8.5 mg/g

水平 Level	X ₁		X ₂		X ₃		X ₄		X ₅	
	频次 Frequency	占比/% Proportion								
-2	167	23.8	157	22.3	208	29.6	147	20.9	117	16.6
-1	144	20.5	134	19.1	136	19.3	153	21.8	193	27.5
0	142	20.2	142	20.2	102	14.5	156	22.2	200	28.4
1	136	19.3	147	20.9	102	14.5	133	18.9	123	17.5
2	114	16.2	123	17.5	155	22.0	114	16.2	70	10.0
合计 Total	703	100	703	100	703	100	703	100	703	100

注:频次为在可滴定酸含量为 7.5~8.5 mg/g 的 703 套方案中 5 因素各个水平的出现次数;占比为 5 因素各个水平出现频次占合计次数的百分比。

Note: The frequency is the number of occurrences of 5 factors at each level in the 703 sets with titratable acid content of 7.5–8.5 mg/g; the proportion is the percentage of occurrences of 5 factors at each level.

根据 5 因素各个水平的出现频次及占比计算各因素加权平均值,之后利用标准差及 95% 置信区间原则计算相应的优化区域水平^[15],转换为实际的土壤含水率,番茄苗期、始花结果期、果实生长初期、快速膨大期、品质形成期 5 个阶段分别为 18.6%~19.1%,18.8%~19.3%,18.5%~19.0%,18.7%~19.2%和 18.4%~18.9%。同理,可以计算出其他两个频率分布较大的方案的 5 个生长发育时期土壤含水率控制水平,即可滴定酸含量在 6.5~7.5 mg/g 的方案为 18.6%~19.1%,18.5%~18.9%,19.2%~19.6%,18.8%~19.2%和 18.5%~19.0%;可滴定酸含量在 5.5~6.5 mg/g 的方案为 19.2%~19.7%,18.8%~19.2%,19.8%~20.3%,20.0%~20.5%和 19.8%~20.4%。

3 讨论

番茄果实中的可滴定酸主要是苹果酸和柠檬酸,最佳风味的形成需要较高的糖度和相对较高的酸度,高糖和低酸则会令番茄果实味道变淡^[16]。

果实生长后期水分亏缺对番茄可滴定酸含量有显著影响^[17],本试验通过对番茄生育期的进一步细分,结果表明,快速膨大期土壤含水率对可滴定酸含量影响最大,且随着水分亏缺的加剧可滴定酸含量越高,这可能由于快速膨大期是果实快速生长的阶段,该阶段水分供应充足有利于番茄膨大,但是水分对番茄果实中可滴定酸有稀释作用,其含量随土壤水分的增加而减少^[18]。由于快速膨大期土壤含水率对可滴定酸含量影响最大,且该阶段也是番茄产量形成的重要阶段,因此探索该阶段合理的水分调控对达到较高的可滴定酸含量和果实产量有重要意义。同时,因子主效应分析还发现,在其他阶段为低

水水平时,品质形成期土壤含水率影响较大,而在其他阶段土壤含水率较高时,果实生长初期土壤含水率影响较大,这为不同地区土壤水分调控提供了参考,水分供应充足地区可以通过调控果实生长初期土壤水分以达到较高的可滴定酸含量,而水分匮乏地区则应重点调控品质形成期的土壤水分。

前人研究表明,全生育期的适度水分亏缺有利于番茄果实中可滴定酸的积累^[19]。本研究中,不同生育阶段土壤水分调控对番茄果实可滴定酸含量有不同的影响,番茄果实可滴定酸含量随果实生长初期、快速膨大期土壤含水率的增加总体呈下降趋势,这与前人的研究结果^[20]一致;而可滴定酸含量随始花结果期土壤含水率的增加呈先降低后升高趋势,这可能是由于如果该阶段土壤水分过高,番茄会进行旺盛的营养生长,从而造成高叶果比,而叶果比大时,果实含酸量会增高^[21]。

番茄果实可滴定酸含量与苗期土壤含水率无关,这可能是由于番茄苗期主要进行营养生长。刘浩^[7]以 12.0%,14.4%,16.8%,19.2%为土壤水分控制下限的研究表明,番茄果实可滴定酸含量随成熟采摘期水分亏缺程度的增加而增大。而本研究中,番茄果实可滴定酸含量随品质形成期土壤含水率的增加呈开口向下的抛物线型变化,土壤含水率为 12.0%~16.8%时,番茄可滴定酸含量增大;在 16.8%~21.6%时,可滴定酸含量减小。这可能与两个研究中控制土壤水分的阶段不同有关。成熟番茄果实中 92% 以上是水分^[22],因此水分供应充足导致果实含水量增加,从而导致可滴定酸的稀释。本研究还表明,土壤水分过低也不利于可滴定酸的积累,这可能是由于调控可滴定酸积累的代谢关键酶需要一个适宜的水分环境,但具体原因有待进一步

研究。

本研究发现,苗期土壤含水率与果实生长初期、快速膨大期土壤含水率之间的交互作用会导致番茄果实可滴定酸含量下降。这可能与苗期土壤含水率高时会导致番茄旺盛的营养生长,有利于生长初期和快速膨大期果实的增大,从而造成可滴定酸的稀释有关。但是,番茄苗期营养生长旺盛也会造成一个高的叶果比,同时品质形成期是番茄果实品质形成的关键时期,这可能是品质形成期土壤含水率与苗期土壤含水率的交互作用造成番茄果实可滴定酸含量提高的一个原因,但还需要进一步试验证实。

4 结 论

1)各阶段土壤含水率对番茄果实可滴定酸含量影响的大小排序为快速膨大期>品质形成期>果实生长初期>始花结果期>苗期。

2)单因子效应分析表明,当其他阶段土壤含水率控制在 16.8%~19.2%时,番茄果实可滴定酸含量受苗期土壤含水率的影响不大,但受果实生长初期和快速膨大期土壤含水率影响较大,在土壤含水率为 12.0%~14.4%时可滴定酸含量最大;果实可滴定酸含量随品质形成期土壤含水率提高呈开口向下的抛物线变化,最大值在土壤含水率为 16.8%~19.2%时出现。

3)耦合效应分析表明,苗期和始花结果期土壤含水率与果实生长初期、快速膨大期土壤含水率之间的交互作用,以及快速膨大期与品质形成期土壤含水率之间的交互作用均能导致果实可滴定酸含量降低;而品质形成期与苗期、始花结果期土壤含水率之间的交互作用均能提高果实可滴定酸含量。

4)将番茄苗期、始花结果期、果实生长初期、快速膨大期、品质形成期 5 个阶段的土壤含水率依次控制在 18.6%~19.1%,18.8%~19.3%,18.5%~19.0%,18.7%~19.2%和 18.4%~18.9%时,可望获得较高的番茄果实可滴定酸含量(7.5~8.5 mg/g)。

[参考文献]

[1] 肖自添. 温室基质培番茄水氮耦合效应研究 [D]. 北京:中国农业科学院,2008.
Xiao Z T. Water and nitrogen interactions on tomato growing in eco-organic type soilless culture [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2008.

[2] 陈 思,牛晓丽,周振江,等. 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 [J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31

(4):16-20.

Chen S, Niu X L, Zhou Z J, et al. Effect of water and fertilizers on organic acid content of tomato under alternate partial root-zone irrigation [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2013, 31(4):16-20.

- [3] Renquist A R, Reid J B. Processing tomato fruit quality: influence of soil water deficits at flowering and ripening [J]. *Crop and Pasture Science*, 2001, 52(8):793-867.
- [4] Birhanu K, Tilahun K. Fruit yield and quality of drip-irrigated tomato under deficit irrigation [J]. *African Journal of Food Agriculture Nutrition and Development*, 2010, 10(2):2139-2151.
- [5] 刘明池,张慎好,刘向莉. 亏缺灌溉时期对番茄果实品质和产量的影响 [J]. *农业工程学报*, 2005, 21(S2):92-95.
Liu M C, Zhang S H, Liu X L. Effects of different deficit irrigation periods on yield and fruit quality of tomato [J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(S2):92-95.
- [6] Kuşsu 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.
- [7] 刘 浩. 温室番茄需水规律与优质高效灌溉指标研究 [D]. 北京:中国农业科学院,2010:45-50.
Liu H. Water requirement and optimal irrigation index for effective water use and high quality of tomato in greenhouse [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010: 45-50.
- [8] 程智慧. 园艺学概论 [M]. 北京:中国农业出版社,2003.
Cheng Z H. *General horticulture* [M]. Beijing: Chinese Agricultural Press, 2003.
- [9] Favati F, Lovelli S, Galgano F, et al. Processing tomato quality as affected by irrigation scheduling [J]. *Scientia Horticulturae*, 2009, 122(4):562-571.
- [10] Hunter W G, Hunter J S. *Statistics for experimenters: an introduction to design, data analysis, and model building* [M]. New York: Wiley, 1978.
- [11] 陈希孺. 机会的数学 [M]. 北京:清华大学出版社,2000.
Chen X R. *Opportunistic mathematics* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
- [12] 杨 德. 试验设计与分析 [M]. 北京:中国农业出版社, 2002.
Yang D. *Design and analysis of experiments* [M]. Beijing: Chinese Agricultural Press, 2002.
- [13] 劳家桎. 土壤农化分析手册 [M]. 北京:中国农业出版社, 1988.
Lao J C. *Soil chemical analysis handbook* [M]. Beijing: Chinese Agricultural Press, 1988.
- [14] 王小勇. 关于多元二次回归模型因子效应分析的一点改进意见 [J]. *甘肃农业科技*, 1987(9):15-20.
Wang X Y. Little improvements on multiple quadratic regression factor effect analysis [J]. *Gansu Agricultural Science and Technology*, 1987(9):15-20.

- [20] 韩强, 邵海燕, 陈杭君, 等. 臭氧处理对桑葚采后生理品质的影响及机理 [J]. 中国食品学报, 2016, 16(10): 147-152.
Han Q, Gao H Y, Chen H J, et al. Effect and mechanism of ozone treatment on mulberry postharvest physiological quality [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2016, 16(10): 147-152.
- [21] 李丽萍, 韩涛, 黄万荣. 臭氧处理对京白梨贮藏特性的影响 [J]. 食品科学, 1993, 14(4): 59-62.
Li L P, Han T, Huang W R. The effect of ozone treatment on storage characteristics of pear [J]. Food Science, 1993, 14(4): 59-62.
- [22] 郭丹, 韩英群, 郝义. 不同品种苹果冷藏期间品质与生理变化 [J]. 食品科学, 2016, 37(22): 289-294.
Guo D, Han Y Q, Hao Y. Changes in physiology and quality of different varieties of apple during cold storage [J]. Food Science, 2016, 37(22): 289-294.
- [23] Jha S N, Rai D R, Shrama R. Physico-chemical quality parameters and overall quality index of apple during storage [J]. Journal of Food Science and Technology-Mysore, 2012, 49(5): 594-600.
- [24] Roth E, Berna A, Beullens K, et al. Postharvest quality of integrated and organically produced apple fruit [J]. Postharvest Biology and Technology, 2007, 45(1): 11-19.
- [25] 王亚萍, 郭叶, 费学谦. 二氧化氯处理对猕猴桃采后部分生理指标的影响 [J]. 食品工业科技, 2016, 37(8): 323-325, 329.
Wang Y P, Guo Y, Fei X Q. Studies on the changes of kiwi fruit's physiology and metabolism under different chlorine dioxide conditions [J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(8): 323-325, 329.

(上接第 75 页)

- [15] 洪伟, 吴承祯. 马尾松人工林经营模式及其应用 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1999.
Hong W, Wu C Z. Management mode of *Pinus massoniana* plantation and its application [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1999.
- [16] Gierson D, Kader A A. Fruit ripening and quality [M]. Germany: Springer Netherlands, 1986: 241-280.
- [17] Marouelli W A, Silva W L C. Water tension thresholds for processing tomatoes under drip irrigation in Central Brazil [J]. Irrigation Science, 2007, 25(4): 411-418.
- [18] Obreza T A, Pitts D J, McGovern R J, et al. Deficit irrigation of micro-irrigated tomato affects yield, fruit quality, and disease severity [J]. Journal of Production Agriculture, 1996, 9(2): 270-275.
- [19] Zushi K, Matsuzoe N. Effect of soil water deficit on vitamin C, sugar, organic acid, amino acid and carotene contents of large-fruited tomatoes [J]. Journal of the Japanese Society for Horticultural Science, 1998, 67(6): 927-933.
- [20] 齐红岩, 李天来, 曲春秋, 等. 亏缺灌溉对设施栽培番茄物质分配及果实品质的影响 [J]. 中国蔬菜, 2004(2): 10-12.
Qi H Y, Li T L, Qu C Q, et al. Effects of deficit irrigation on dry matter distribution and fruit quality of tomato in protected cultivation [J]. China Vegetables, 2004(2): 10-12.
- [21] 张上隆, 陈昆松. 果实品质形成与调控的分子生理 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2007.
Zhang S L, Chen K S. Molecular physiology of fruit quality development and regulation [M]. Beijing: Chinese Agricultural Press, 2007.
- [22] Ho L C. The physiological basis for improving tomato fruit quality [J]. Acta Horticulturae, 1999, 487: 33-40.