

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.08.011

不同生育阶段土壤含水率对番茄果实维生素 C 含量的影响

刘杰^{1,2} 陈思^{1,2} 周振江^{1,2} 胡田田^{1,2}

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为实现番茄的优质生产及水资源高效利用, 探求不同生育阶段土壤含水率与番茄果实维生素 C 含量之间的关系。以番茄苗期、始花结果期、果实生长初期、膨大期和品质形成期 5 个阶段的土壤含水率为试验因素, 每个因素设 5 个水平, 采取五元二次通用旋转组合设计, 进行盆栽试验。建立维生素 C 含量与不同阶段土壤含水率的数学模型, 分析因子主效应、单因子效应及两因素的耦合效应, 并对模型模拟寻优。结果表明, 品质形成期土壤含水率对番茄果实维生素 C 含量的影响最大, 苗期次之, 始花结果期最小。控制其它阶段土壤水分分为 (70% ~ 80%) θ_f 时, 果实维生素 C 含量随苗期、始花结果期土壤含水率变化不大 (变异系数分别为 2.46%、3.08%); 随果实生长初期、膨大期和品质形成期土壤含水率呈抛物线变化, 且影响程度依次增大 (变异系数分别为 5.79%、8.09%、17.25%), 且这 3 个阶段土壤含水率分别为 (67.79% ~ 77.79%) θ_f 、(65.58% ~ 75.58%) θ_f 、(68.86% ~ 78.86%) θ_f 时, 维生素 C 含量有最大值, 分别为 24.10、24.21、24.10 mg/(100 g)。耦合效应表明, 苗期与始花结果期和果实生长初期、始花结果期与膨大期、膨大期与品质形成期土壤含水率对番茄果实维生素 C 含量的交互作用均呈正效应; 苗期与膨大期和品质形成期、始花结果期与果实生长初期和品质形成期、果实生长初期与膨大期和品质形成期土壤含水率间的交互作用均呈负效应。在 5 个阶段土壤含水率分别为 (50% ~ 60%) θ_f 、(90% ~ 100%) θ_f 、(50% ~ 60%) θ_f 、(80% ~ 90%) θ_f 、(70% ~ 80%) θ_f 时, 番茄果实维生素 C 含量达最高 30.10 mg/(100 g), 但不利于产量的形成。当 5 个阶段土壤含水率分别为 (90% ~ 99.9%) θ_f 、(90% ~ 99.8%) θ_f 、(90% ~ 99.6%) θ_f 、(74.0% ~ 81.8%) θ_f 、(74.3% ~ 82.5%) θ_f 时, 可以同时获得较高的番茄单株产量 (996.75 ~ 1 037.99 g) 和维生素 C 含量 (25.40 ~ 26.02 mg/(100 g))。

关键词: 番茄; 维生素 C; 土壤含水率; 生育阶段; 五元二次通用旋转组合设计

中图分类号: S641.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)08-0072-09

Effect of Soil Water Content at Different Growth Stages on Vitamin C Content in Tomato Fruit

Liu Jie^{1,2} Chen Si^{1,2} Zhou Zhenjiang^{1,2} Hu Tiantian^{1,2}

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

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

Abstract: Pot experiment was conducted to determine the response of vitamin C (VC) content in tomato fruit to soil water condition at different growth stages. Growth stages were divided by the law of tomato development and the growth of the first cluster fruits, including seeding, flowering, fruit early growing, inflation and quality formation stages. Five levels of soil water condition were set at each stage, and quadratic general composite rotatable method with five factors was used. Mathematical model between VC content and soil water content of different stages was established. The main effect, single effect and

收稿日期: 2015-11-30 修回日期: 2016-02-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51279169)、国家高技术研究发展计划 (863 计划) 项目 (2011AA100504) 和高等学校创新引智计划 (111 计划) 项目 (B12007)

作者简介: 刘杰 (1991—), 男, 博士生, 主要从事农业节水理论与技术研究, E-mail: 530967899@qq.com

通信作者: 胡田田 (1966—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事农业节水理论与技术研究, E-mail: hutiant@nwsuaf.edu.cn

coupling effect of two factors were analyzed, and model optimization was operated in DPS 3.0. Results showed that the influence of soil water content at quality formation stage on VC content was top-drawer, seeding stage was ranked the second and flowering stage was taken the least. When other stages' soil water content was $(70\% \sim 80\%) \theta_f$, with the increase of soil water content at seeding or flowering stages, VC content in tomato fruit was varied slightly (variable coefficients were 2.46% and 3.08%, respectively), while a downwards parabola change was found when soil water content was risen at other three stages. Additionally, the peaks of parabola were 24.10 mg/(100 g), 24.21 mg/(100 g) and 24.10 mg/(100 g) when soil water contents were $(67.79\% \sim 77.79\%) \theta_f$, $(65.58\% \sim 75.58\%) \theta_f$ and $(68.86\% \sim 78.86\%) \theta_f$, respectively. There were significant coupling effects of two factors on tomato VC content, both positive and negative. VC content might reach the highest level of 30.10 mg/(100 g) when soil water content at five different stages were $(50\% \sim 60\%) \theta_f$, $(90\% \sim 100\%) \theta_f$, $(50\% \sim 60\%) \theta_f$, $(80\% \sim 90\%) \theta_f$ and $(70\% \sim 80\%) \theta_f$, respectively, while yield was decreased sharply. Tomato yield and VC content in fruit acquired desirable level, which were 996.75 ~ 1 037.99 g/plant and 25.40 ~ 26.02 mg/(100 g) when soil water contents at five stages were $(90\% \sim 99.9\%) \theta_f$, $(90\% \sim 99.8\%) \theta_f$, $(90\% \sim 99.6\%) \theta_f$, $(74.0\% \sim 81.8\%) \theta_f$ and $(74.3\% \sim 82.5\%) \theta_f$, respectively.

Key words: tomato; vitamin C; soil water content; growth stage; quadratic general composite rotatable design

引言

近年来,消费市场蔬菜需求量持续增加,对品质更加关注。番茄风味独特、营养价值丰富,世界范围内广泛种植。维生素 C 是番茄重要的抗氧化物质之一。人类自身不能合成维生素 C,只能从食物中摄取,且维生素 C 在人体内不能保存,必需每天补充。经常食用番茄可以降低部分癌症的发病率^[1-2],也可以预防冠心病^[3]。因此,维生素 C 含量成为衡量蔬菜营养品质的一项重要指标。

土壤水分状况是影响番茄产量及品质的重要因素^[4-5]。在生育期内进行适当水分亏缺不仅节约水资源,还可以提高番茄品质指标^[6-11]。目前有关亏缺灌溉对果蔬影响的研究已有不少报道,刘明池等^[12]从番茄开花期开始,研究了亏缺灌溉开始时期对樱桃番茄品质的影响,发现不同时期开始亏缺灌溉处理(75%正常灌水量)对品质影响程度不同,亏缺时期越早,品质越高。陈平^[13]研究了单一时期亏水处理对番茄品质的影响,结果显示,各生育期水分亏缺均显著提高果实维生素 C 含量。唐晓伟等^[14]从果实膨大期开始对番茄进行亏水试验研究,结果表明重度亏水(25%正常灌水量)下番茄果实维生素 C 含量最高。

目前关于水分对番茄品质影响的研究大都集中于亏缺灌溉方面,而从各阶段土壤水分状况及其不同阶段交互作用的角度,进行不同生育阶段土壤水分与品质关系的研究报道还很少。本试验依据番茄的生长规律结合第一穗果的发育情况,把番茄全生

育期划分为 5 个阶段,即苗期(缓苗后至第一穗现蕾)、始花结果期(第一穗现蕾至第一穗坐果)、果实生长初期(第一穗坐果至果实直径约 4 cm)、膨大期(果实直径 4 cm 至果实发白)、品质形成期(果实发白至成熟采摘),以这 5 个生长阶段的土壤含水率 X_i 为试验因素,各设 5 个水平,探求番茄果实维生素 C 含量与不同阶段土壤水分的关系。若采用完全试验设计方案,需要 $5^5 = 3 125$ 个处理,增加了试验的难度。旋转组合设计可以在保证足量信息的前提下大大减少试验次数,并且可以充分描述大多数稳态过程的响应^[15]。本文采用五元二次通用旋转组合设计,建立番茄果实维生素 C 含量与各阶段土壤含水率的数学模型,进行因子主效应、单因子效应及耦合效应分析,系统研究番茄果实维生素 C 含量对不同生育阶段土壤含水率的响应关系,以期对番茄的优质生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

采用盆栽试验方式,于 2014 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防雨棚下进行。供试番茄品种为“农城种业 906”。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,田间持水量 θ_f 为 24% (质量含水率),速效磷 28.08 mg/kg,速效钾 83.40 mg/kg。试验用桶底部内径 25 cm,顶部内径 30 cm,高 30 cm,桶底部装河沙 2 kg。每桶装风干土 20 kg,装土容重 1.3 g/cm^3 。每桶装 2 个 PVC 管用于灌水,管长

25 cm,直径 2.5 cm,每管均匀打 3 排圆孔,管外层用 1 mm 直径纱网缠绕以防土壤堵塞。试验所用肥料:过磷酸钙(含 P_2O_5 44.0%)、尿素(含纯 N 46.4%)、硫酸钾(含 K_2O 50%)和有机肥(含氨基酸 10%以上、氮磷钾 4%以上、有机质 30%以上、蛋白质 8%以上),每千克土壤施用量分别为 0.132 g P_2O_5 、0.240 g N、0.210 g K_2O 、20 g 有机肥。磷肥和有机肥一次性基施,氮肥和钾肥按基追比 1:2 施用,追肥分别在第一穗果和第二穗果膨大期随灌水施用。

1.2 试验设计

以番茄 5 个生育阶段的土壤含水率为试验因

素,用 $x_1 \sim x_5$ 表示各含水率真实值, $X_1 \sim X_5$ 表示编码值,每个因素设置 5 个水平(表 1),采用五元二次通用旋转组合设计,共 32 个处理(表 2),重复 3 次,随机区组排列。3 月 10 日育苗,4 月 15 日定植,定植后立即浇水至田间持水量进行缓苗,缓苗期过后,开始灌水处理。通过称重法确定灌水时间和灌水量,当土壤含水率接近灌水下限时进行灌水。5 月 16 号摘心,每株留 2 穗果。

1.3 测定项目与方法

番茄果实成熟采摘后,统计产量,并测定第二穗果实维生素 C 含量(表 2),测定方法参照文献[16]。

表 1 试验因素水平

Tab.1 Levels and factors of experiment

%

编码	试验因素				
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
2	90 ~ 100	90 ~ 100	90 ~ 100	90 ~ 100	90 ~ 100
1	80 ~ 90	80 ~ 90	80 ~ 90	80 ~ 90	80 ~ 90
0	70 ~ 80	70 ~ 80	70 ~ 80	70 ~ 80	70 ~ 80
-1	60 ~ 70	60 ~ 70	60 ~ 70	60 ~ 70	60 ~ 70
-2	50 ~ 60	50 ~ 60	50 ~ 60	50 ~ 60	50 ~ 60

注:表中数据为土壤含水率占田间持水量 θ_f 的百分数。

表 2 试验设计方案

Tab.2 Experimental design

处理 编号	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	产量/ (g·株 ⁻¹)	维生素 C 质量比/ (mg·(100 g) ⁻¹)	处理 编号	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	产量/ (g·株 ⁻¹)	维生素 C 质量比/ (mg·(100 g) ⁻¹)
2	-1	-1	-1	1	-1	729	21.23	18	2	0	0	0	0	776	26.13
3	-1	-1	1	-1	-1	605	23.18	19	0	-2	0	0	0	713	25.44
4	-1	-1	1	1	1	898	20.12	20	0	2	0	0	0	544	27.06
5	-1	1	-1	-1	-1	477	24.83	21	0	0	-2	0	0	609	23.49
6	-1	1	-1	1	1	808	24.10	22	0	0	2	0	0	846	21.26
7	-1	1	1	-1	1	757	18.46	23	0	0	0	-2	0	639	24.07
8	-1	1	1	1	-1	761	19.30	24	0	0	0	2	0	697	19.60
9	1	-1	-1	-1	-1	543	20.07	25	0	0	0	0	-2	536	17.93
10	1	-1	-1	1	1	661	18.86	26	0	0	0	0	2	798	17.46
11	1	-1	1	-1	1	599	20.00	27	0	0	0	0	0	684	23.30
12	1	-1	1	1	-1	746	18.51	28	0	0	0	0	0	792	23.91
13	1	1	-1	-1	1	631	18.17	29	0	0	0	0	0	785	23.99
14	1	1	-1	1	-1	536	19.97	30	0	0	0	0	0	771	24.01
15	1	1	1	-1	-1	594	24.89	31	0	0	0	0	0	757	23.56
16	1	1	1	1	1	1033	20.59	32	0	0	0	0	0	695	23.80

1.4 数据统计与分析

采用 DPS 3.01 数据处理软件进行试验数据统计分析,用 SigmaPlot 10.0 软件作图,用 Design Expert 8.0.5b 软件综合寻优。

2 结果与分析

2.1 维生素 C 含量与 5 个阶段土壤含水率之间回归模型的建立

采用 DPS 3.01 软件对试验结果进行方差分析

(表 3),并建立果实维生素 C 含量 Y 与 5 个生长阶段土壤含水率 X_i 之间的五元二次回归模型,统计检验值 $F_2 = 5.00 > F_{0.01}(20,11) = 4.1$,表明模型是有效的。剔除 $\alpha = 0.1$ 下不显著项,得到最终简化模型

$$Y = 24.07 - 0.34X_1 + 0.47X_2 - 0.29X_3 - 0.67X_4 - 0.52X_5 +$$

$$0.14X_1^2 + 0.31X_2^2 - 0.66X_3^2 - 0.79X_4^2 - 1.83X_5^2 + 0.27X_1X_2 + 1.02X_1X_3 - 0.20X_1X_4 - 0.33X_2X_3 + 0.15X_2X_4 - 0.24X_2X_5 - 0.56X_3X_4 + 1.30X_4X_5 \quad (1)$$

表 3 试验结果方差分析

Tab.3 Analysis of mean square deviation for experiment result

变异来源	平方和	自由度	均方	F	显著水平
X ₁	72.78	1	72.78	34.77	0.000 1
X ₂	143.87	1	143.87	68.75	0
X ₃	52.46	1	52.46	25.07	0.000 4
X ₄	288.26	1	288.26	137.74	0
X ₅	171.42	1	171.42	81.91	0
X ₁ ²	14.99	1	14.99	7.16	0.021 6
X ₂ ²	76.37	1	76.37	36.49	0.000 1
X ₃ ²	338.59	1	338.59	161.79	0
X ₄ ²	492.08	1	492.08	235.13	0
X ₅ ²	2 619.23	1	2 619.23	1 251.56	0
X ₁ X ₂	30.06	1	30.06	14.37	0.003 0
X ₁ X ₃	441.04	1	441.04	210.74	0
X ₁ X ₄	17.77	1	17.77	8.49	0.014 1
X ₁ X ₅	0.054	1	0.054	0.026	0.875 1
X ₂ X ₃	46.27	1	46.27	22.11	0.000 7
X ₂ X ₄	9.31	1	9.31	4.45	0.058 6
X ₂ X ₅	25.17	1	25.17	12.03	0.005 3
X ₃ X ₄	131.86	1	131.86	63.01	0
X ₃ X ₅	6.42	1	6.42	3.07	0.107 6
X ₄ X ₅	722.09	1	722.09	345.04	0
回归	209.11	20	10.46	F ₂ = 5.00	0.001 0
剩余	23.03	11	2.09		
失拟	22.63	6	3.77	F ₁ = 48.22	0
误差	0.39	5	0.078		
总和	232.13	31			

2.2 因子主效应分析

因子主效应分析旨在探明各因子对目标函数影响的主次地位。函数变幅是一个综合性较好、较合理的判定因子效应的指标^[17]，因此，采用函数变幅分析各阶段土壤水分对番茄果实维生素 C 含量的影响。将回归模型分别固定在 -2、-1、0、1、2 水平下各因子的函数变幅见表 4。

表 4 不同水平下各因子的函数变幅及位次

Tab.4 Factors' amplitude and rank at different levels

编码	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	因子位次
-2	5.94	1.29	1.47	3.40	5.18	X ₁ > X ₅ > X ₄ > X ₃ > X ₂
-1	2.59	1.09	1.38	2.50	4.13	X ₅ > X ₁ > X ₄ > X ₃ > X ₂
0	0.57	0.90	1.30	1.77	3.49	X ₅ > X ₄ > X ₃ > X ₂ > X ₁
1	1.21	0.75	1.25	1.47	3.50	X ₅ > X ₄ > X ₃ > X ₁ > X ₂
2	3.67	0.63	1.23	1.81	4.14	X ₅ > X ₁ > X ₄ > X ₃ > X ₂
平均变幅	2.80	0.93	1.33	2.19	4.09	X ₅ > X ₁ > X ₄ > X ₃ > X ₂

表 4 表明，各水平下因子平均效应优劣依次为 X₅、X₁、X₄、X₃、X₂，说明品质形成期土壤含水率对番茄果实维生素 C 含量的影响最大，苗期次之，始花结果期最小。X₁ 的变幅在 -2 水平下最大，在 -1、2

水平下仅次于 X₅，在 0 水平下最小，说明苗期土壤含水率对维生素 C 含量的影响与其他阶段土壤水分状况有关。还可以看出，不论在哪个水平下，除苗期外其他阶段土壤含水率均依次表现为 X₅、X₄、X₃、X₂，随着生育阶段的推进，土壤含水率对番茄果实维生素 C 含量的影响越来越大，节水调质更趋于番茄果实的成熟阶段进行。

2.3 单一阶段土壤含水率对番茄维生素 C 含量的影响

对回归模型(式 1)降维，即将其他因子水平固定为 0 水平，得各因子与维生素 C 含量之间的一元二次偏回归模型，并计算各阶段维生素 C 含量随土壤含水率变化的变异系数，分别为：2.46%、3.08%、5.79%、8.09%、17.25%。表明品质形成期土壤含水率对果实维生素 C 含量影响最大、膨大期次之、苗期最小。果实生长初期、膨大期和品质形成期土壤水分过高或过低均对维生素 C 含量均有较大影响。随着果实生长初期、膨大期和品质形成期土壤含水率的变化，番茄果实中维生素 C 含量均呈先增加后减少的趋势(图 1)，且土壤含水率分别为(67.79% ~ 77.79%) θ_f、(65.58% ~ 75.58%) θ_f、(68.86% ~ 78.86%) θ_f 时有最大值，依次为 24.10、24.21、24.10 mg/(100 g)。

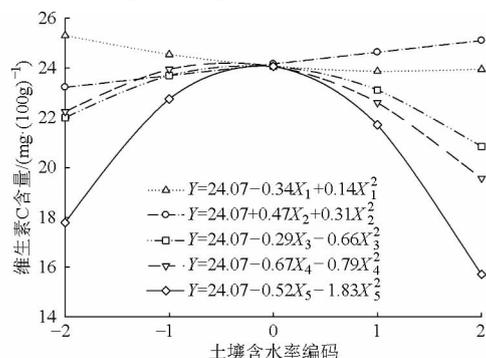


图 1 各生育阶段土壤含水率对维生素 C 含量的影响
Fig.1 Effects of soil water content on VC content at different growth stages of tomato

2.4 不同阶段土壤含水率间的耦合效应

对回归模型(式(1))降维，得到两因素之间的耦合效应模型

$$Y = 24.07 - 0.34X_1 + 0.74X_2 + 0.14X_1^2 + 0.31X_2^2 + 0.27X_1X_2 \quad (2)$$

$$Y = 24.07 - 0.34X_1 - 0.29X_3 + 0.14X_1^2 - 0.66X_3^2 + 1.02X_1X_3 \quad (3)$$

$$Y = 24.07 - 0.34X_1 - 0.67X_4 + 0.14X_1^2 - 0.79X_4^2 - 0.20X_1X_4 \quad (4)$$

$$Y = 24.07 + 0.47X_2 - 0.29X_3 + 0.31X_2^2 - 0.66X_3^2 - 0.33X_2X_3 \quad (5)$$

$$Y = 24.07 + 0.47X_2 - 0.67X_4 + 0.31X_2^2 - 0.79X_4^2 + 0.15X_2X_4 \quad (6)$$

$$Y = 24.07 + 0.47X_2 - 0.52X_5 + 0.31X_2^2 - 1.83X_5^2 - 0.24X_2X_5 \quad (7)$$

$$Y = 24.07 - 0.29X_3 - 0.67X_4 - 0.66X_3^2 - 0.79X_4^2 - 0.56X_3X_4 \quad (8)$$

$$Y = 24.07 - 0.67X_4 - 0.52X_5 - 0.79X_4^2 - 1.83X_5^2 + 1.30X_4X_5 \quad (9)$$

用 SigmaPlot 10.0 作响应面图, 得到两因素间耦合效应如图 2 所示。

由耦合效应模型的交互项系数的正负可知, 苗期与始花结果期和果实生长初期、始花结果期与膨大期、膨大期与品质形成期土壤水分间的交互作用有利于番茄果实维生素 C 的积累, 苗期与膨大期、始花结果期与果实生长初期、始花结果期与品质形成期以及果实生长初期与膨大期土壤水分间的交互作用阻碍番茄果实维生素 C 的提高。

图 2a 中, 始花结果期土壤含水率不断增大, 当苗期土壤含水率不大于 (80% ~ 90%) θ_f 时, 维生素

C 含量先减小后增加; 苗期土壤含水率高于 (80% ~ 90%) θ_f 时, 维生素 C 含量逐渐增加, 且增幅不断增大。苗期土壤含水率逐渐增大, 当始花结果期土壤含水率不大于 (60% ~ 70%) θ_f 时, 维生素 C 含量逐渐降低; 始花结果期土壤含水率高于 (60% ~ 70%) θ_f 时, 维生素 C 含量先减少后增加。当两个阶段土壤含水率均为 (90% ~ 100%) θ_f 时, 维生素 C 含量达最大值 27.21 mg/(100 g)。

苗期土壤含水率为 (50% ~ 60%) θ_f 时, 随果实生长初期土壤含水率增加, 果实中维生素 C 含量不断降低; 苗期土壤含水率为 (90% ~ 100%) θ_f 时, 变化规律相反; 苗期土壤含水率为 (60% ~ 90%) θ_f 时, 随果实生长初期土壤含水率增加, 维生素 C 含量先增大后减小 (图 2b)。苗期土壤含水率逐渐增加, 当果实生长初期土壤含水率为 (50% ~ 70%) θ_f 时, 维生素 C 含量逐渐增大; 果实生长初期土壤含水率为 (70% ~ 80%) θ_f 时, 维生素 C 含量先减小后增加; 果实生长初期土壤含水率高于 80% θ_f 时, 维生素 C 含量逐渐降低 (图 2b)。

由图 2c ~ 2f 可知, 无论苗期土壤含水率处于哪

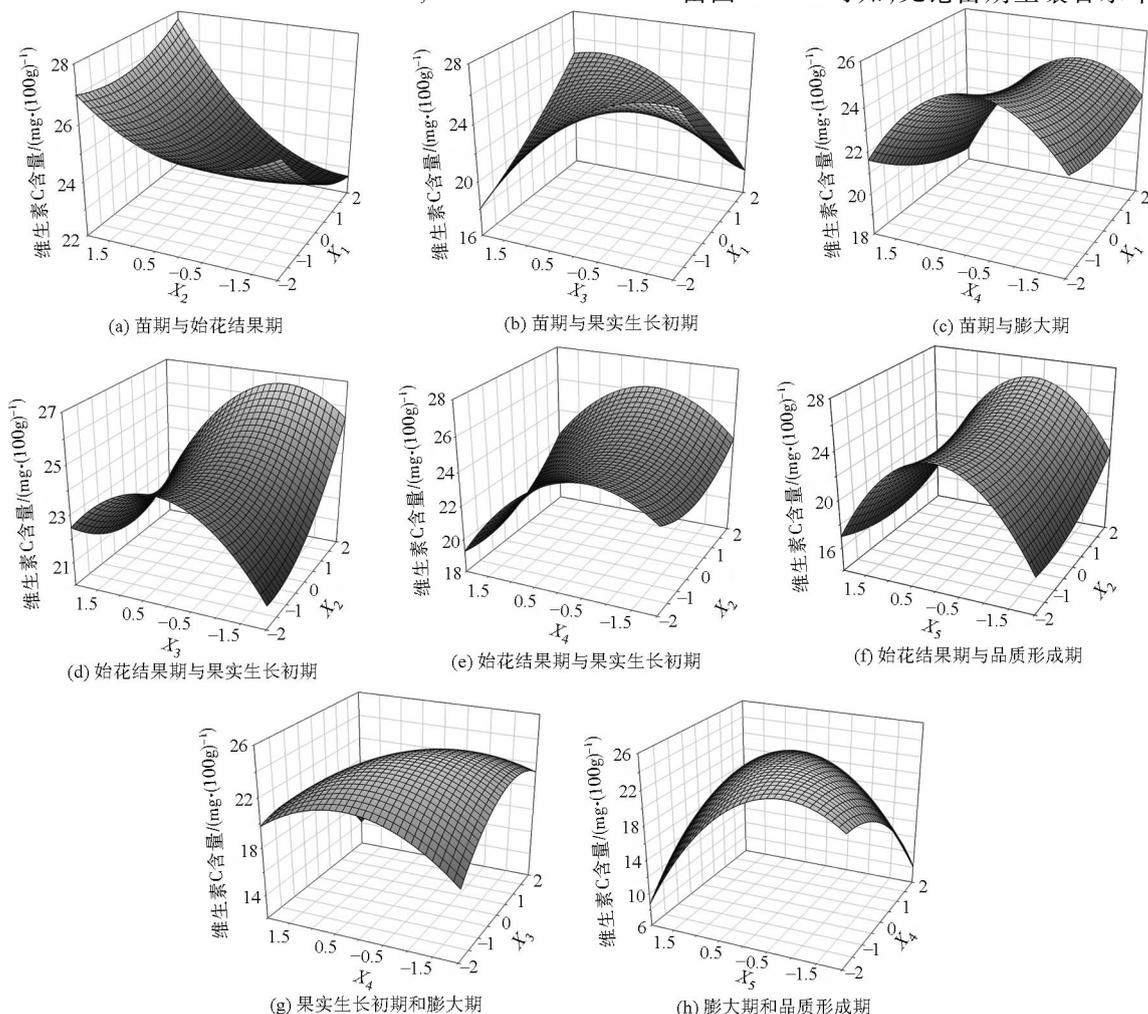


图 2 两因素对番茄果实维生素 C 含量的影响

Fig. 2 Effects of two factors on VC content in tomato fruit

个水平,随着膨大期土壤含水率增大,果实中维生素 C 含量均呈先增加后降低的趋势;类似地,无论始花结果期土壤含水率处于哪个水平,随着果实生长初期、膨大期、品质形成期土壤含水率增大,番茄果实维生素 C 含量先增加后降低。随着苗期土壤水分增加,膨大期土壤含水率不高于 $(70\% \sim 80\%) \theta_f$ 时,维生素 C 含量先减小后增大;膨大期土壤含水率大于 $(70\% \sim 80\%) \theta_f$ 时,维生素 C 含量则呈减少趋势(图 2c)。随着始花结果期土壤含水率增加,果实生长初期土壤含水率为 $(50\% \sim 60\%) \theta_f$ 时,维生素 C 含量逐渐增加;果实生长初期土壤含水率高于 $60\% \theta_f$ 时,维生素 C 含量先减小后增加(图 2d)。膨大期土壤含水率在任意水平变化时,维生素 C 含量随着始花结果期土壤含水率的增加呈先降低后升高趋势(图 2e)。随着始花结果期土壤含水率的增加,品质形成期土壤含水率为 -2 水平时,果实维生素 C 含量逐渐增加;品质形成期土壤含水率高于 -2 水平时,维生素 C 含量呈先减小后增大变化趋势(图 2f)。

膨大期与果实生长初期和品质形成期土壤水分的耦合效应均表现为上凸曲面(图 2g、2h)。需要注意的是,当品质形成期土壤含水率为 $(50\% \sim 60\%) \theta_f$ 时,随着膨大期土壤含水率的增加,番茄果实维生素 C 含量逐渐降低,且降幅越来越大。分别对模型(8)、(9)求最大值,得到果实生长初期和快速膨大期、膨大期和品质形成期土壤含水率分别为 $(65.26\% \sim 75.26\%) \theta_f$ 、 $(65.79\% \sim 75.79\%) \theta_f$ 和 $(62.36\% \sim 72.36\%) \theta_f$ 、 $(65.84\% \sim 75.84\%) \theta_f$ 时,维生素 C 含量有最大值,分别为 $24.10 \text{ mg}/(100 \text{ g})$ 、 $24.43 \text{ mg}/(100 \text{ g})$ 。

2.5 维生素 C 含量模型寻优

运用 DPS 3.01 软件对番茄果实中维生素 C 含量与土壤含水率之间回归模型寻优,得出本试验条件下番茄维生素 C 含量最大值及各阶段土壤含水率最佳组合(表 5)。结果表明,当番茄 5 个阶段土壤含水率为 $(50\% \sim 60\%) \theta_f$ 、 $(90\% \sim 100\%) \theta_f$ 、 $(50\% \sim 60\%) \theta_f$ 、 $(80\% \sim 90\%) \theta_f$ 、 $(70\% \sim 80\%) \theta_f$ 时,番茄果实维生素 C 含量达最大值 $30.10 \text{ mg}/(100 \text{ g})$ 。

2.6 番茄产量与 5 个阶段土壤含水率之间回归模型的建立及简要分析

根据试验方案和试验结果(表 2),用 DPS 分析得产量与 5 个生育期土壤含水率之间的二次回归模型(剔除 $\alpha = 0.1$ 下不显著项)

$$Y = 745.80 - 21.83X_1 + 56.17X_2 + 56.17X_3 + 68.92X_4 - 28.17X_2^2 - 18.30X_3^2 - 18.55X_4^2 + 25.50X_1X_2 + 32.00X_2X_3 + 37.00X_2X_4 + 33.38X_3X_4 \quad (10)$$

表 5 维生素 C 含量最大时各阶段土壤水分的优化组合
Tab. 5 Optimized combination of all factors for maximum Vc content in tomato fruit

苗期	始花结果期	果实生长初期	膨大期	品质形成期	维生素 C 含量最大值/ $(\text{mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1})$
-2	2	-2	1	0	30.10

模型统计检验 F 值为 4.91,由于 $F_{0.01}(11, 20) < 3.35$,说明 F 检验极显著,模型拟合得很好。当其他因子固定为 0 水平时,番茄产量随苗期土壤水分呈线性递减变化,随始花结果期、膨大期及品质形成期土壤水分呈抛物线变化,随果实生长初期土壤水分的增加线性增加。计算产量随各阶段土壤含水率变化的变异系数,分别为 4.83%、7.63%、11.89%、13.40%、16.33%。可见,品质形成期土壤水分对番茄产量的影响最大,膨大期次之,苗期最小。由模型(10)交互项系数可知,始花结果期与苗期、果实生长初期和品质形成期以及果实生长初期与膨大期土壤水分间的交互作用均有利于番茄产量的提高。本研究条件下,将维生素 C 含量最高时各阶段土壤水分编码值代入模型(10),得番茄产量为 $308.55 \text{ g}/\text{株}$,显然维生素 C 最优时土壤水分供应不足导致大幅度减产。

2.7 番茄维生素 C 和产量综合寻优

应用 Design Expert 8.0 软件对番茄产量和果实维生素 C 含量在 $(477.00 \text{ g}/\text{株}, 1200.00 \text{ g}/\text{株})$ 和 $(17.46 \text{ mg}/(100 \text{ g}), 35.00 \text{ mg}/(100 \text{ g}))$ 范围内进行综合寻优(表 6),即可望获得较高产量和维生素 C 的各阶段土壤水分优化方案。当 5 个阶段土壤含水率分别为 $(90\% \sim 100\%) \theta_f$ 、 $(90\% \sim 100\%) \theta_f$ 、 $(90\% \sim 100\%) \theta_f$ 、 $(72.4\% \sim 82.4\%) \theta_f$ 、 $(73.4\% \sim 83.4\%) \theta_f$ 时,番茄单株产量为 1014.01 g ,维生素 C 含量为 $25.80 \text{ mg}/(100 \text{ g})$ 。另外,综合前 9 个方案,当番茄前 3 个阶段土壤含水率分别为 $(90\% \sim 99.9\%) \theta_f$ 、 $(90\% \sim 99.8\%) \theta_f$ 、 $(90\% \sim 99.6\%) \theta_f$ 、膨大期为 $(74.0\% \sim 81.8\%) \theta_f$ 、品质形成期为 $(74.3\% \sim 82.5\%) \theta_f$ 时,番茄单株产量为 $996.75 \sim 1037.99 \text{ g}$,维生素 C 含量为 $25.40 \sim 26.02 \text{ mg}/(100 \text{ g})$ 。

3 讨论

维生素 C 含量是评价果蔬品质的重要指标^[18]。本研究中,各因子函数变幅值的结果表明,苗期土壤含水率对番茄果实维生素 C 含量的影响与其他阶段土壤含水率的水平有关。当其他阶段土壤含水率过高($(90\% \sim 100\%) \theta_f$)或过低($(50\% \sim 60\%) \theta_f$ 、 $(60\% \sim 70\%) \theta_f$)时,苗期土壤含水率的影响仅次于甚至超过品质形成期,当其他阶段土壤含水率适中

表6 番茄产量和果实维生素C含量优化方案
Tab.6 Optimization of tomato yield and VC content

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	产量/(g·株 ⁻¹)	维生素C含量/(mg·(100g) ⁻¹)	总评
1	2.00	2.00	2.00	0.24	0.34	1014.01	25.80	0.594
2	2.00	2.00	2.00	0.22	0.40	1018.19	25.73	0.594
3	2.00	2.00	2.00	0.18	0.31	1002.07	25.98	0.594
4	2.00	2.00	2.00	0.24	0.28	1005.28	25.92	0.594
5	1.99	2.00	2.00	0.27	0.35	1018.99	25.70	0.593
6	2.00	2.00	1.94	0.29	0.37	1016.13	25.74	0.593
7	2.00	2.00	2.00	0.40	0.39	1037.99	25.40	0.593
8	2.00	1.98	2.00	0.19	0.25	996.75	26.02	0.592
9	2.00	1.98	1.98	0.32	0.43	1030.19	25.49	0.592
∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴
55	-2.00	-0.42	-0.63	0.83	0.60	830.60	25.69	0.479
56	-1.78	-1.13	-1.08	0.51	0.21	797.61	26.46	0.477
57	-2.00	-1.50	-0.21	0.16	0.61	817.83	25.72	0.471

((70%~80%) θ_f 、(80%~90%) θ_f)时,苗期土壤含水率的影响很小。原因可能在于,苗期充分供水或过度亏水,幼苗容易徒长或老化,幼苗质量下降,进而影响定植后番茄生长发育与果实品质^[19-20]。本研究还表明,当其他阶段土壤含水率固定在(70%~80%) θ_f 时,各阶段土壤水分对番茄维生素C含量的影响程度依次为 X_5 、 X_4 、 X_3 、 X_2 、 X_1 ,即随着生育阶段的推进,土壤含水率对番茄品质的影响越来越大。各因子函数的平均变幅值也表明,番茄品质形成期土壤水分对维生素C含量的影响最大。单因子效应分析进一步表明,番茄果实维生素C含量随苗期与始花结果期土壤含水率变化的变异系数分别为2.46%、3.08%,明显小于果实生长初期、快速膨大期及品质形成期3个阶段土壤含水率的影响(变异系数分别为5.79%、8.09%、17.25%)。CUI等^[21]在梨枣的试验中发现果实生长及成熟阶段控水可以显著提高可溶性固形物和维生素C含量,进一步说明果实成熟阶段适宜的水分亏缺可以提高果实品质^[22]。

本研究以番茄维生素C含量最优为目标,模拟得到各阶段最适土壤含水率依次为(50%~60%) θ_f 、(90%~100%) θ_f 、(50%~60%) θ_f 、(80%~90%) θ_f 、(70%~80%) θ_f 。番茄果实维生素C含量受各阶段土壤含水率交互作用的影响,其中苗期与始花结果期土壤含水率为显著的正交互效应,即苗期土壤含水率一定时,始花结果期土壤含水率越高,越有利于番茄维生素C含量的提高;始花结果期与果实生长初期土壤含水率为显著的负交互效应,即当始花结果期土壤水分较高时,要想保持较高的维生素C含量,必需把果实生长初期土壤水分控制在较低水平。苗期需水量少,曾向辉等^[23]从节水增产角度得出番

茄苗期适宜土壤水分为(55%~70%) θ_f ,略高于模拟值,可见苗期土壤含水率为(50%~60%) θ_f 时,番茄具有节水增产优质潜质。因而在田间生产中对水分管理提出了更高的要求,可以通过采取滴灌等方式严格控制灌水量,待番茄缓苗后进行土壤水分处理,田间条件下还需要进一步试验研究。始花结果期充足的水分供应对番茄正常坐果至关重要,寻优结果中始花结果期土壤水分最宜为(90%~100%) θ_f ,高于李建明等^[24]在小区试验中推荐开花坐果期灌溉上限指标(85%~90%) θ_f ,这可能与试验方式有关。膨大期番茄对水分变化敏感^[25],这个阶段相对充足的水分供应可以促使果实正常膨胀,保证产量。品质形成期土壤含水率对维生素C含量的调控表现为开口向下抛物线,过多的土壤水分不利于提高维生素C含量,可能与“稀释效应”^[11]有关。维生素C含量模型寻优结果还表明番茄5个阶段土壤水分低高交替变化有利于果实维生素C含量最大化,具体原因还需进一步试验研究。

4 结论

(1)各生育阶段土壤含水率对番茄果实维生素C含量影响表现依次为:品质形成期、苗期、膨大期、果实生长初期、始花结果期,在果实成熟期进行节水调质最为有利。

(2)单因子效应表现为,当其他阶段土壤含水率控制在(70%~80%) θ_f 时,番茄果实维生素C含量受苗期与始花结果期土壤含水率的影响不大,随着果实生长初期、膨大期和果实品质形成期土壤含水率的变化,番茄果实中维生素C含量均呈先增加后减少的变化规律,且当土壤含水率在(70%~80%) θ_f 附近时维生素C含量有最大值。

(3)耦合效应表现为,苗期与始花结果期和果实生长初期、膨大期与始花结果期和品质形成期土壤含水率对番茄果实维生素 C 的含量的交互作用均有利于果实维生素 C 含量的提高;苗期与膨大期、始花结果期与果实生长初期和品质形成期、果实生长初期与膨大期土壤含水率间的交互作用会抑制果实维生素 C 含量增加。

(4)将苗期、始花结果期、果实生长初期、膨大期和品质形成期土壤含水率分别控制在(50% ~

60%) θ_f 、(90% ~ 100%) θ_f 、(50% ~ 60%) θ_f 、(80% ~ 90%) θ_f 、(70% ~ 80%) θ_f 时,番茄果实维生素 C 含量可望有最大值 30.10 mg/(100 g),然而导致大幅度减产;当 5 个阶段土壤含水率分别为(90% ~ 99.9%) θ_f 、(90% ~ 99.8%) θ_f 、(90% ~ 99.6%) θ_f 、(74.0% ~ 81.8%) θ_f 和(74.3% ~ 82.5%) θ_f 时,番茄单株产量为 996.75 ~ 1 037.99 g,维生素 C 含量为 25.40 ~ 26.02 mg/(100 g)。

参 考 文 献

- 1 NGUYEN M L. Lycopene: chemical and biological properties [J]. Food Technology, 1999, 53(2):38-45.
- 2 JACOBS E J, CONNELL C J, MCCULLOUGH M L, et al. Vitamin C, vitamin E and multivitamin supplement and stomach cancer mortality in the Cancer Prevention Study II cohort[J]. Cancer Epidemiology Biomarkers and Prevention, 2002, 11(1):35-41.
- 3 马琳,程五凤. 抗氧化维生素和冠心病预防[J]. 中华临床营养杂志,2001, 4(4):262-264.
MA Lin, CHENG Wufeng. Antioxidant vitamins and the prevention of coronary heart disease [J]. Chinese Journal of Clinical Nutrition, 2001, 4(4):262-264. (in Chinese)
- 4 姚磊,杨阿明. 不同水分胁迫对番茄生长的影响[J]. 华北农学报, 1997, 12(2):102-106.
YAO Lei, YANG Aming. Influences of different water stress on tomato growth [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 1997, 12(2):102-106. (in Chinese)
- 5 王秀康,邢英英,张富仓. 膜下滴灌施肥番茄水肥供应量的优化研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(1):141-150.
WANG Xiukang, XING Yingying, ZHANG Fucang. Optimal amount of irrigation and fertilization under drip fertigation for tomato [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1):141-150. (in Chinese)
- 6 OLALLA F M D S, JUAN J D. Production of muskmelon (*Cucumis melo* L.) under controlled deficit irrigation in a semi-arid climate [J]. Agricultural Water Management, 2002, 54(2):93-105.
- 7 刘明池,刘向莉. 亏缺灌溉对番茄果实品质和产量的影响[J]. 中国蔬菜,2005(增刊):46-48.
LIU Mingchi, LIU Xiangli. Effect of deficit irrigation on yield and fruit properties of tomato [J]. China Vegetables, 2005 (Supp.):46-48. (in Chinese)
- 8 PATANE 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):590-596.
- 9 CHEN J L, KANG S Z, DU T S, et al. Quantitative response of greenhouse tomato yield and quality to water deficit at different growth stages [J]. Agricultural Water Management, 2013, 129(11):152-162.
- 10 侯伟娜,刘旭,何翠,等. 不同水肥处理对日光温室番茄品质及产量的影响[J]. 河南农业大学学报,2014,48(1):25-28.
HOU Weina, LIU Xu, HE Cui, et al. Effect of different irrigation and fertilization treatments on tomato quality and yield in sola greenhouse [J]. Journal of Henan Agricultural University, 2014, 48(1):25-28. (in Chinese)
- 11 邢英英,张富仓,张燕,等. 滴灌施肥水肥耦合对温室番茄产量、品质和水氮利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(4):713-726.
XING Yingying, ZHANG Fucang, ZHANG Yan, et al. Effect of irrigation and fertilizer coupling on greenhouse tomato yield, quality, water and nitrogen utilization under fertigation [J]. Scientia Agriculture Sinica, 2015, 48(4):713-726. (in Chinese)
- 12 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(增刊2):92-95.
LIU Mingchi, ZHANG Shenhao, LIU Xiangli. Effect of different deficit irrigation periods on yield and fruit quality of tomato [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(Supp.2):92-95. (in Chinese)
- 13 陈平. 石羊河流域温室番茄节水调质及优化灌溉制度试验研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2009.
CHEN Ping. Experimental research on quality control and optimal irrigation pattern of the tomato in greenhouse in Shi Yang River Basin [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2009. (in Chinese)
- 14 唐晓伟,刘明池,郝静,等. 调亏灌溉对番茄品质与风味组分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(4):970-977.
TANG Xiaowei, LIU Mingchi, HAO Jing, et al. Influences of regulated deficit irrigation on sensory quality and flavor components of tomato [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(4):970-977. (in Chinese)
- 15 CILLIERS J J, AUSTIN R C, TUCKER J P. An evaluation of formal experimental design procedures for hydrocyclone modelling [M]//SVAROVSKY L, THEW M T. Hydrocyclones, Analysis and Applications, Netherlands: Springer, 1992:31-49.
- 16 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社,2000.
- 17 王小勇. 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.
- 18 吴雪,王坤元,牛晓丽,等. 番茄综合营养品质指标构建及其对水肥供应的响应[J] 农业工程学报, 2014, 30(7):119-127.

- WU Xue, WANG Kunyuan, NIU Xiaoli, et al. Construction of comprehensive nutritional quality index for tomato and its response to water and fertilizer supply [J]. Transactions of the CSAE, 2014,30(7): 119 - 127. (in Chinese)
- 19 葛小光. 新编蔬菜育苗大全 [M]. 北京:中国农业出版社,2004.
- 20 王广龙,夏冬,杨泽恩,等. 幼苗质量对番茄植株生长发育和产量品质的影响 [J]. 江苏农业科学, 2014,42(5):140 - 144.
- 21 CUI N B, DU T S, KANG S Z, et al. Regulated deficit irrigation improved fruit quality and water use efficiency of pear-jujube trees [J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(4): 489 - 497.
- 22 张芮,成自勇,王旺田,等. 不同生育期水分胁迫对延后栽培葡萄产量与品质的影响 [J]. 农业工程学报, 2014, 30(24): 105 - 113.
- ZHANG Rui, CHENG Ziyong, WANG Wangtian, et al. Effect of water stress in different growth stages on grape yield and fruit quality under delayed cultivation facility [J]. Transactions of the CSAE, 2014,30(24): 105 - 113. (in Chinese)
- 23 曾向辉,王慧峰,戴建平,等. 温室西红柿滴灌灌水制度试验研究 [J]. 灌溉排水学报, 1999,18(4):23 - 26.
- ZENG Xianghui, WANG Huifeng, DAI Jianping, et al. Study on irrigation regime for tomato under trickle irrigation in greenhouse [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 1999, 18(4): 23 - 26. (in Chinese)
- 24 李建明,邹志荣. 灌溉土壤水分上限对温室番茄开花坐果期生理指标的影响 [J]. 西北农业学报, 2000,9(4):71 - 74.
- LI Jianming, ZOU Zhirong. Effect of different soil water irrigation maximum on physiological indexes of greenhouse tomato at flowering and fruit-bearing periods [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica,2000,9(4): 71 - 74. (in Chinese)
- 25 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.
- LIU Hao. 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. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 64 页)

- 11 PARK D P, DAVIS K, GILANI S, et al. Reactive nitrogen species produced in water by non-equilibrium plasma increase plant growth rate and nutritional yield[J]. Current Applied Physics, 2013, 13(Supp.): S19 - S29.
- 12 ITARASHIKI T, HAYASHI N, YONESU A. Sterilization effect of nitrogen oxide radicals generated by microwave plasma using air[J]. Vacuum, 2014, 110: 213 - 216.
- 13 ANAGHIZI S J, TALEBIZADEH P, RAHIMZADEH H, et al. The configuration effects of electrode on the performance of dielectric barrier discharge reactor for NO<sub>x</sub> removal[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2015, 43(6): 1944 - 1953.
- 14 MALIK M A, JIANG C, HELLER R, et al. Ozone-free nitric oxide production using an atmospheric pressure surface discharge—a way to minimize nitrogen dioxide co-production[J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 283: 631 - 638.
- 15 陈喜华. 介质阻挡放电及其应用 [D]. 苏州:苏州大学, 2013.
- CHEN Xihua. The applications on dielectric barrier discharge [D]. Suzhou: Suzhou University, 2013. (in Chinese)
- 16 史俊文. 高压脉冲放电等离子体固氮及其机理的研究 [D]. 苏州:苏州大学, 2010.
- SHI Junwen. Study on nitrogen fixation into water by the technique of pulsed high-voltage discharge plasma and the mechanism [D]. Suzhou: Suzhou University, 2010. (in Chinese)
- 17 王钰恒,汤红卫,仲崇山. 空气介质阻挡放电固氮的研究 [J]. 高压电器, 2015(6): 81 - 85.
- WANG Yuheng, TANG Hongwei, ZHONG Chongshan. Study on air dielectric barrier discharge nitrogen fixation [J]. High Voltage Apparatus, 2015(6): 81 - 85. (in Chinese)
- 18 汤红卫,赵睿明. 电磁场理论基础 [M]. 北京:中国电力出版社, 2009.
- 19 SUN Q, ZHU A, YANG X, et al. Formation of NO<sub>x</sub> from N<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> in catalyst-pellet filled dielectric barrier discharges at atmospheric pressure [J]. Chemical Communications, 2003(12): 1418 - 1419.
- 20 BAI Mindong, ZHANG Zhitao, BAI Xiyao, et al. Plasma synthesis of ammonia with a microgap dielectric barrier discharge at ambient pressure [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2003, 31(6): 1285 - 1291.