

番茄果实品质和叶片保护酶对水肥水平的响应

朱艳丽¹, 梁银丽^{1,2*}, 郝旺林³, 罗安荣¹, 林兴军², 白彩虹¹

(1 西北农林科技大学生命科学学院, 陕西杨凌 712100; 2 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100;

3 西北农林科技大学林学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 通过3个土壤相对含水量(W1, 50%~60%; W2, 70%~80%; W3, 90%~100%)和3个施肥水平(F1, N 0.187 g/kg + P₂O₅ 0.131 g/kg; F2, N 0.267 g/kg + P₂O₅ 0.187 g/kg; F3, N 0.347 g/kg + P₂O₅ 0.243 g/kg)共9个处理的盆栽试验, 研究了番茄结果期果实品质、叶片保护酶及叶绿素含量的变化规律, 旨在为番茄结果期合理的水肥管理提供理论依据。结果表明: 在整个结果期, W1F2处理有利于提高果实品质; W2F2处理下果实中的渗透物质(游离氨基酸)保持着较高水平, 且叶片保护酶活性较高, 丙二醛含量低; W2F3处理的叶片叶绿素含量保持较高水平, W2F2处理番茄果实单株产量高。相关分析表明: 果实品质与超氧化物歧化酶、叶绿素含量呈正相关, 而与丙二醛含量呈负相关; 游离氨基酸含量与过氧化物酶活性、脯氨酸含量呈显著正相关, 而与丙二醛含量呈显著负相关。综合分析, 番茄结果期较优的水肥组合为N 0.267 g/kg + P₂O₅ 0.187 g/kg和70%~80%的土壤相对含水量。

关键词: 番茄; 土壤相对含水量; 氮、磷肥; 果实品质; 保护酶活性; 叶绿素

中图分类号: S641.2

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2011)-01-0137-10

Responses of fruit quality, leaf protective enzyme systems of tomato to soil water and fertilization

ZHU Yan-li¹, LIANG Yin-li^{1,2*}, HAO Wang-lin³, LUO An-rong¹, LIN Xing-jun², BAI Cai-hong¹

(1 College of Life Science, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resource, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3 College of Forestry, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: To explore the optimum soil water content and fertilizer amount during the fruiting stage of tomato, three soil water treatments (W1, 90%–100%; W2, 70%–80% and W3, 50%–60% of field capacity) and three fertilizer levels (F1, N 0.187 g/kg + P₂O₅ 0.131 g/kg; F2, N 0.267 g/kg + P₂O₅ 0.187 g/kg; F3, N 0.347 g/kg + P₂O₅ 0.243 g/kg) were set to study fruit quality, leaf protective enzyme system and chlorophyll content of potted tomato at the stage. The results show that in the whole fruiting stages, the fruit quality is improved under the W1F2 treatment, and the penetrant (as free amino acid) level in fruits and activities of leaf protecting enzymes are high under the W2F2 treatment, while the MDA content is low. Chlorophyll content of leaves is high under the W2F3, and tomato fruit yield per plant is higher under the W2F2. Correlation analysis indicates there are positive correlations between fruit quality and SOD activity and chlorophyll content at the fruiting stages, while there is a negative correlation between fruit quality and MDA content. There are significant positive correlations between free amino acid contents and SOD activity and Pro content, while there is a significant negative correlation of between free amino acid and MDA content. In general, combining N 0.267 g/kg, P₂O₅ 0.187 g/kg and 70%–80% soil relative water content is the optimum condition for tomato development during the fruiting stage.

收稿日期: 2010-01-27

接受日期: 2010-08-23

基金项目: 中国科学院重要方向项目(KZCX2-YW-443-3); 国家科技支撑项目(2006BAD09B07); 中国科学院西部行动项目(KZCX2-XB2-05-01)资助。

作者简介: 朱艳丽(1984—), 女, 山西运城人, 硕士, 研究方向为作物水分生理生态。E-mail: zyl840203@163.com

* 通讯作者 Tel: 029-87012227, E-mail: liangyl@ms.iswc.ac.cn

Key words: tomato; soil relative water content; nitrogen and phosphorous fertilizer; fruit quality; activity of protective enzymes; chlorophyll

水分是影响作物生产力的最重要因素之一^[1]。科学的水肥管理,保持良好的土壤环境是获得蔬菜优质高产的重要措施之一^[2]。由于经济、技术的落后等原因,我国蔬菜生产上过量施肥、灌水现象普遍存在。因此,对番茄栽培中的水肥管理做更深入的研究,对鲜蔬菜优质高产具有十分重要的理论和实践意义。

前人研究表明,适当的降低土壤含水量,可提高番茄果实中 Vc、可溶性糖、有机酸等的含量,其中基质相对含水量为 80% 时番茄产量较高,且品质较好^[3-5]。随着施肥量的增加,番茄果实中 Vc、有机酸、游离氨基酸含量增加,可溶性糖含量减小,糖酸比降低,果实的风味变差^[6],也有报道表明,Vc 含量随施氮量的增加而降低^[7]。叶片叶绿素含量随基质相对含水量的减少而减少^[5],随施氮量的增加而增加^[8],但也有相反的报道^[9]。植物遭受水分胁迫时会产生一系列的适应性反应,轻度水分胁迫能诱导 SOD、POD 等保护酶活性的增加,脯氨酸含量的增加使渗透势下降,提高其抗旱性,维持光合作用、呼吸作用等生理生化过程^[10-12]。孙群和梁宗锁^[13]的研究表明,水分亏缺条件下,合适的氮素供应能提高叶片中酶促防御系统的活性,尤其是 SOD 活性;而缺氮和氮素水平过高则会增加叶肉细胞中 MDA 含量。

目前,关于水肥、氮肥以及氮磷钾配施方面对蔬菜品质、产量、水分利用率^[14-15]以及不同水分胁迫^[16-17]对作物膜保护酶系统的影响的研究较多,但是关于不同水肥水平对番茄果实品质、产量、叶片保护酶及叶绿素含量在结果期的系统研究报道较少。本研究采用盆栽试验,探讨不同水肥水平对番茄结果期果实品质、产量和叶片保护酶及叶绿素含量的影响,确定出高产、优质的水肥水平,为番茄水肥管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2009 年 5 月~2009 年 9 月在陕西杨凌西北农林科技大学水土保持研究所试验场的隔雨大棚中进行。供试土壤为陕北丘陵沟壑区典型的黄绵土,田间最大持水量为 22%,土壤容重 1.15 g/cm³,有机质含量 12.58 g/kg,碱解氮 16.45 mg/kg,速效

磷 26.93 mg/kg,有效钾 221.85 mg/kg,pH 7.9,全氮 0.723 g/kg,EC 0.35 mS/cm。供试番茄品种为“天福 501”。

试验共设 3 个土壤水分水平(W1、W2、W3,分别为土壤相对含水量的 50%~60%、70%~80%、90%~100%),依据在陕北丘陵沟壑区进行番茄需肥量研究筛选的适宜需要用量^[18]确定 3 个肥料水平(F1, F2, F3 分别为 N 0.187 g/kg + P₂O₅ 0.131 g/kg, N 0.267 g/kg + P₂O₅ 0.187 g/kg, N 0.347 g/kg + P₂O₅ 0.243 g/kg),共 9 个处理,每处理 9 次重复。

采用盆栽试验,盆的直径为 30 cm,高为 25 cm,土壤经自然风干、过筛去杂后装盆,每盆装含水量 5.11% 的风干土 9.46 kg,相当于干土 9 kg。分别在 5 月 12 日、6 月 10 日、7 月 16 日、8 月 20 日施入氮肥,每次施入总量的 25%,磷肥为磷酸二铵,在 5 月 2 日番茄苗移栽前一次性与土混合均匀施入,氮肥尿素溶于水施入。采用营养钵育苗,2009 年 5 月 2 日筛选叶龄为五叶一心长势一致、生长良好的幼苗移栽入盆中,每盆移栽一棵。全生育期采用称重法控制灌水。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 果实品质和叶片酶活性 于 2009 年 7 月 20 日(结果前期)、08 月 11 日(结果盛期)、9 月 2 日(结果末期)于早上 9:00~10:00 采集长势、生理成熟度基本一致的番茄果实,同时采集从植株顶部数第 5~6 片外围完全展开、长势一致的功能叶,放入预冷的冰盒中,迅速带回实验室进行相关指标的测定。

可溶性总糖用苯酚硫酸法;可溶性蛋白用紫外吸收法;维生素 C(Vc)用钼蓝比色法;有机酸用 0.01 mol/L NaOH 滴定法;游离氨基酸用茚三酮比色法测定;超氧化物歧化酶(SOD)用氮蓝四唑(NBT)光还原法测定,以抑制氮蓝四唑(NBT)光氧化还原反应 50% 酶量为 1 个酶活力单位(U),酶活性用[U/(g·h),FW]表示;过氧化物酶(POD)采用愈创木酚法测定,酶活性以(μg/g,FW)表示;丙二醛(MDA)含量用硫代巴比妥(TBA)显色法测定,根据消光值计算 MDA 浓度;叶绿素用 80% 丙酮提取法;脯氨酸采用磺基水杨酸法测定^[19]。每个测定指标重复 3 次,取其平均值。

1.2.2 产量 于果实生理成熟时采摘,共采摘 24 次,每次采摘记下果实个数和重量,分别统计各个处

理的总产量,求其平均值,以单株产量表示。

1.3 数据处理

采用 SPSS16.0 软件对试验数据进行方差分析,用 LSR 法进行多重比较和相关性分析,数据以平均值 $\pm$ 标准差表示,用 Excel 软件作图。

2 结果与分析

2.1 番茄结果期果实品质及游离氨基酸含量对水肥水平的响应

2.1.1 结果前期果实品质对水肥水平的响应 从表 1 可以看出,在相同施肥水平下,Vc 含量随土壤相对含水量的增加而降低,而在 F3 处理下,呈先升后降的趋势;在 W3 处理下,Vc 含量随施肥量的增加而减少,而 W2 处理则呈相反的趋势,在 W1 条件下,Vc 含量呈先升后降的趋势。在相同的土壤相对含水量下,可溶性蛋白、可溶性糖和有机酸含量随施肥量的增加基本表现为先升后降的趋势,但有机酸含量在 W2 处理下,表现为 F1 > F3 > F2。在相同施肥水平下,随土壤相对含水量的增加,可溶性糖和有机酸含量逐渐减少,而可溶性蛋白含量基本呈先升后降的趋势;但在 F1 处理下,W1 处理的可溶性蛋白含量最高。可知,W1F2 处理下番茄果实品质较好。

2.1.2 结果盛期果实品质对水肥水平的响应 表 1 显示,在 F2 和 F1 处理下,Vc 含量表现为 W2 > W1 > W3,F3 处理则呈 W1 > W2 > W3;在 W3 和 W1 条件下,Vc 含量随施肥量的增加而增加,而 W2 处理表现为 F1 > F2 > F3,表明 W2 和 F2 处理有利于果实中 Vc 含量的积累。与结果前期相比,不同土壤相对含水量和施肥水平对果实中可溶性糖、有机酸和可溶性蛋白含量的影响基本相同,但在相同的土壤相对含水量下,可溶性蛋白含量在 W3 处理下最高,W2 次之。表明 W1F2 处理下番茄果实品质较好。

2.1.3 结果末期果实品质对水肥水平的响应 表 1 还看出,在相同的土壤相对含水量下,施肥水平对 Vc 含量的影响和结果前期基本一致,但在 W2 和 W1 条件下,Vc 含量随施肥量的增加而升高,而 W3 处理表现为 F2 > F3 > F1。在相同的土壤相对含水量下,随施肥量的增加,有机酸含量逐渐降低,可溶性糖和可溶性蛋白含量则呈先升后降的趋势;在相同肥料水平下,土壤相对含水量对果实中可溶性蛋白、可溶性糖和有机酸含量的影响与结果前期基本一致。表明 W1 和 F2 处理有利于提高果实品质。

2.1.4 番茄结果期果实中游离氨基酸含量对水肥水平的响应 由图 1 可知,在整个结果期,番茄果实中的游离氨基酸含量对水肥水平的响应基本一致,且处理间差异显著。在相同的土壤相对含水量下,游离氨基酸含量随施肥量的增加呈先升后降的趋势,在相同施肥水平下,随土壤相对含水量的增加呈现同样的趋势。可知,W2F2 处理有利于番茄结果期果实中游离氨基酸含量的积累。

2.2 番茄结果期叶片保护酶及叶绿素含量对水肥水平的响应

2.2.1 结果前期叶片保护酶及叶绿素含量对水肥水平的响应 由表 2 知,在相同施肥量下,随相对土壤含水量的增加,POD 活性增加,而 SOD 活性和脯氨酸含量则呈先升后降的趋势,表明土壤相对含水量为 W2 的处理可以提高叶片 SOD、POD 的活性和脯氨酸含量;在相同的相对土壤含水量下,随施肥量的增加,POD 活性和脯氨酸含量基本呈先升后降的趋势,而 SOD 活性则逐渐增加,说明 F2 处理可以提高叶片的 POD、SOD 活性和脯氨酸含量。

在相同施肥量条件下,叶绿素 a 和叶绿素 b 含量随土壤相对含水量的升高呈先升后降的趋势;而在相同的土壤相对含水量下,则随施肥量的增加而升高。由此可见,W2 和 F3 处理下,叶绿素含量较高,叶片浓绿,植株生长茂盛。

2.2.2 结果盛期叶片保护酶及叶绿素含量对水肥水平的响应 在相同施肥量条件下,POD、SOD 活性和脯氨酸含量随土壤相对含水量的增加基本表现为先升后降的趋势;W3 和 W1 处理,POD 活性在 F2 处理下最高,而脯氨酸含量则表现为 F3 > F2 > F1,W2 处理,POD 活性表现为 F1 > F2 > F3,脯氨酸含量则为 F2 > F3 > F1;但在相同的土壤相对含水量下,SOD 活性随施肥量的增加呈先升后降的趋势。表明在 W2 和 F2 处理下,POD、SOD 活性和脯氨酸含量较高,能消除过量的活性氧,维持植株的正常生长(表 2)。

与结果前期相比,叶绿素 a 和叶绿素 b 含量对水肥水平的响应基本一致,但在 W1 处理下,随施肥量的增加呈先升后降的趋势;在 F1 处理下,随土壤相对含水量的升高而降低,且 W1 和 W2 处理间差异不显著。表明 F3 和 W2 处理的叶片叶绿素含量维持在较高的水平(表 2)。

2.2.3 结果末期叶片保护酶及叶绿素含量对水肥水平的响应 表 2 还看出,在相同的土壤相对含水量下,随施肥量的增加,POD 和 SOD 活性逐渐升高,而

表 1 番茄结果期果实品质对水肥水平的响应

Table 1 Responses of soil water and fertilization to fruit quality of tomato during the fruiting stage

处理 Treatment	维生素 C(mg/kg,FW) Vc	可溶性蛋白(g/kg,FW) Soluble protein	可溶性糖(%) Soluble sugar	有机酸(%) Organic acid
结果前期 Early fruiting stage				
W1F1	284.8 ± 8.1 c	15.18 ± 0.32 b	1.85 ± 0.08 bc	0.34 ± 0.02 b
W1F2	312.0 ± 12.5 ab	19.15 ± 0.60 a	2.05 ± 0.40 a	0.41 ± 0.01 a
W1F3	226.2 ± 14.7 ef	18.98 ± 0.57 a	1.98 ± 0.03 ab	0.40 ± 0.02 a
W2F1	271.0 ± 17.2 cd	11.64 ± 0.72 d	1.52 ± 0.09 ef	0.30 ± 0.01 c
W2F2	289.3 ± 1.1 bc	19.81 ± 1.57 a	1.82 ± 0.04 bcd	0.28 ± 0.02 c
W2F3	321.2 ± 8.3 a	19.49 ± 0.36 a	1.76 ± 0.06 cd	0.29 ± 0.01 c
W3F1	247.1 ± 21.3 de	10.22 ± 0.44 e	1.45 ± 0.02 f	0.21 ± 0.02 d
W3F2	204.9 ± 9.4 f	14.16 ± 0.56 bc	1.75 ± 0.03 cd	0.36 ± 0.02 b
W3F3	177.8 ± 22.2 g	13.52 ± 0.96 c	1.65 ± 0.06 de	0.20 ± 0.01 d
结果盛期 Fruit flourish stage				
W1F1	231.4 ± 13.2 c	6.66 ± 0.45 de	2.16 ± 0.11 a	0.30 ± 0.01 c
W1F2	293.2 ± 22.1 b	8.31 ± 0.35 c	2.30 ± 0.56 a	0.43 ± 0.00 a
W1F3	34.90 ± 21.4 a	7.38 ± 0.12 d	1.91 ± 0.08 b	0.36 ± 0.02 b
W2F1	300.7 ± 16.8 b	8.82 ± 0.18 bc	1.54 ± 0.01 cd	0.24 ± 0.03 d
W2F2	293.2 ± 6.7 b	9.41 ± 1.12 b	1.63 ± 0.14 c	0.23 ± 0.02 d
W2F3	249.1 ± 17.3 c	10.36 ± 0.35 a	1.55 ± 0.13 cd	0.25 ± 0.03 d
W3F1	173.0 ± 13.2 d	5.67 ± 0.13 f	1.42 ± 0.01 d	0.19 ± 0.02 e
W3F2	187.4 ± 18.1 d	5.89 ± 0.31 ef	1.50 ± 0.11 cd	0.33 ± 0.02 c
W3F3	236.2 ± 23.4 c	9.70 ± 0.55 ab	1.44 ± 0.10 cd	0.20 ± 0.01 e
结果末期 Later fruiting stage				
W1F1	241.1 ± 23.1 bc	7.22 ± 0.11 g	1.83 ± 0.11 b	0.39 ± 0.01 a
W1F2	262.3 ± 5.3 ab	8.80 ± 0.21 f	2.09 ± 0.44 a	0.31 ± 0.01 bc
W1F3	267.8 ± 32.1 ab	12.74 ± 0.72 e	1.86 ± 0.16 b	0.25 ± 0.02 e
W2F1	190.8 ± 23.4 de	19.80 ± 0.11 c	1.67 ± 0.15 c	0.32 ± 0.02 b
W2F2	212.4 ± 13.6 cd	25.58 ± 1.11 a	1.37 ± 0.02 d	0.28 ± 0.02 d
W2F3	280.0 ± 28.1 a	23.52 ± 1.25 b	0.78 ± 0.02 f	0.27 ± 0.02 d
W3F1	178.6 ± 4.7 e	16.54 ± 1.31 d	1.10 ± 0.09 e	0.22 ± 0.01 f
W3F2	204.3 ± 14.2 de	25.07 ± 0.56 a	1.13 ± 0.14 e	0.28 ± 0.02 d
W3F3	187.6 ± 17.5 de	20.50 ± 0.27 c	0.74 ± 0.03 f	0.23 ± 0.00 f

注(Note): 同列数值后不同字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著 Values followed by different small letters in the same column mean significant difference at 0.05 level.

脯氨酸含量则为先升后降,说明施肥量的增加提高了 SOD 和 POD 活性;在相同的施肥量条件下,POD 活性为 W2 处理最高,W1 次之,W3 最低,而 SOD 活性则基本表现为 W1 > W2 > W3;在 F2 和 F1 处理

下,脯氨酸含量随土壤相对含水量的升高而增加,但 F3 处理则为 W3 > W1 > W2,说明 W3 处理的脯氨酸含量最高,W2 处理能提高 POD 活性,而 SOD 活性则在 W1 处理下较高。

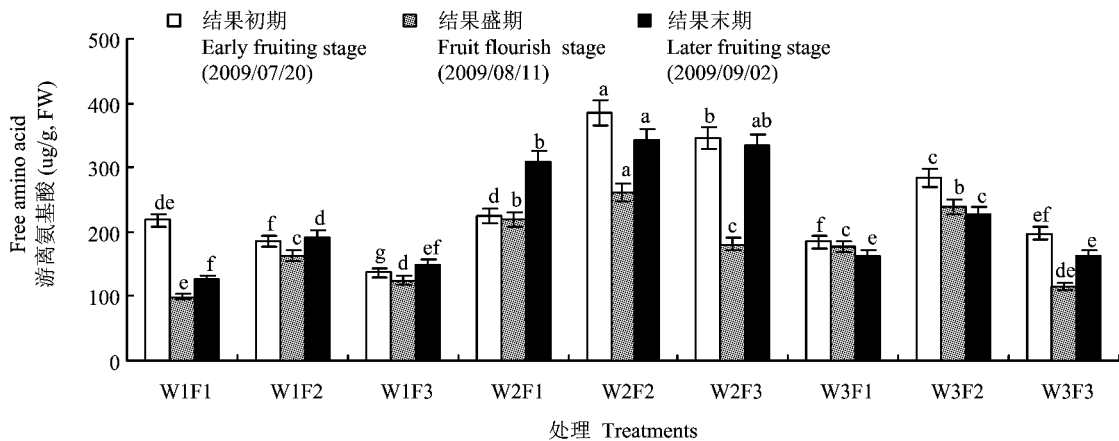


图1 番茄结果期果实中游离氨基酸含量对水肥水平的响应

Fig. 1 Responses of soil water and fertilization to free amino acid of tomato during the fruiting stage

[注 (Note): 图中柱上不同字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著 Different letters above the bars mean significant difference at 0.05 level.]

在 F3 和 F2 处理下,叶绿素 a 和叶绿素 b 含量随土壤相对含水量的增加而降低,但 F1 处理表现为 W2 > W3 > W1; 在相同的土壤相对含水量下, F2 处理的叶片叶绿素 a 和叶绿素 b 含量最高。

2.2.4 番茄结果期叶片丙二醛含量对水肥水平的响应 图 2 看出,在整个结果期,处理间的 MDA 含量差异显著,且 MDA 含量逐渐升高, W2 和 F2 处理的叶片 MDA 含量最低,而 W1 和 F1 处理下 MDA 含量最高,表明随着生育期的进程,叶片的膜系统受损程度不断增加, W2 和 F2 处理的叶片膜受损程度最轻,而 W1 和 F1 胁迫使 MDA 含量增加,导致细胞膜严重受损,不利于植物生长。

2.3 番茄果实单株产量对不同水肥水平的响应

由图 3 可以看出,在相同的施肥量下,果实单株产量随土壤相对含水量的增加基本呈上升趋势;在相同的土壤相对含水量下, F2 处理的番茄单株产量最高, F3 次之, F1 最低。 W3F2 处理下的番茄单株产量最高, W2F2 次之,但两个处理间差异不显著。

2.4 番茄结果期果实品质与叶片保护酶及叶绿素的相关性分析

对果实品质与叶片保护酶及叶绿素含量的相关分析表 3 表明,结果前期, Vc 含量与 POD 活性呈极显著负相关,可溶性糖、可溶性蛋白含量与 SOD 活性呈显著正相关,游离氨基酸含量与 POD、脯氨酸、叶绿素含量均呈显著正相关。随着生育进程的发展,在结果盛期, Vc 含量与叶绿素含量呈显著正相关,果实中的游离氨基酸含量与叶片 POD、SOD 活性,脯氨酸含量均呈显著正相关,可溶性糖、有机酸

含量与脯氨酸含量则呈极显著负相关。结果末期, Vc 含量与 SOD、POD 活性呈显著正相关,而与脯氨酸含量呈极显著负相关,游离氨基酸、可溶性蛋白含量与 POD 活性则呈极显著正相关,可溶性糖、有机酸含量与叶绿素含量呈正相关,而与脯氨酸含量呈负相关,且差异显著。整个结果期,果实品质、游离氨基酸与 MDA 含量呈负相关。

3 讨论与结论

3.1 不同水肥水平对番茄果实品质、产量的影响

Vc、可溶性糖和有机酸含量是蔬菜营养品质的重要指标,含量高低直接决定着蔬菜营养价值和口味,进而影响蔬菜的商品价值^[20]。本研究结果表明,在相同的施肥量下,土壤含水量的降低显著提高了番茄果实中 Vc、可溶性糖和有机酸含量,果实品质较好,和夏秀波^[5]的研究结果一致,而可溶性蛋白和游离氨基酸含量则在 W2 处理下较高。在相同的土壤相对含水量下, F2 处理有利于番茄果实中可溶性糖、可溶性蛋白和有机酸含量的积累,可改善果实的品质,且果实中游离氨基酸含量较高,此结果与刘玉梅等^[21]的研究结果一致。因为 F3 处理有助于源器官的生长,而向果实分配的光合产物较少,并且氮肥用量过多,植株对氮的吸收和利用效率降低,蛋白质和氨基酸的含量不再随施氮量的增加而增加^[22]。在 W3F2 处理下,番茄单株产量最高,但 W3 处理的果实品质下降,且番茄植株易徒长,无效水分消耗较大,而 W2F2 处理的番茄产量虽有降低,但与 W3F2 处理差异不显著,且果实品质较好。

表 2 番茄结果期叶片保护酶及叶绿素含量对水肥水平的响应
Table 2 Responses of soil water and fertilization to leaf protective enzyme systems
and chlorophyll content of tomato during the fruiting stage

处理 Treatment	过氧化物酶 POD ($\mu\text{g/g}$, FW)	超氧化物歧化酶 SOD [$\text{U}/(\text{g} \cdot \text{h})$, FW]	脯氨酸 Proline ($\mu\text{g/g}$, DW)	叶绿素 a Chlorophyll a (mg/g , FW)	叶绿素 b Chlorophyll b (mg/g , FW)
结果前期 Early fruiting stage					
W1F1	7.91 $\pm$ 0.92 f	233.2 $\pm$ 6.9 bc	178.3 $\pm$ 13.4 de	0.51 $\pm$ 0.02 e	0.21 $\pm$ 0.02 cd
W1F2	9.78 $\pm$ 0.85 e	242.4 $\pm$ 18.2 bc	187.8 $\pm$ 14.2 cd	0.51 $\pm$ 0.01 e	0.22 $\pm$ 0.03 cd
W1F3	11.55 $\pm$ 0.80 d	281.6 $\pm$ 21.0 a	161.5 $\pm$ 9.5 e	0.61 $\pm$ 0.02 d	0.26 $\pm$ 0.01 ab
W2F1	11.69 $\pm$ 0.45 d	237.8 $\pm$ 12.4 bc	255.4 $\pm$ 13.8 b	0.62 $\pm$ 0.01 d	0.27 $\pm$ 0.01 ab
W2F2	15.46 $\pm$ 0.51 b	248.7 $\pm$ 0.9 bc	326.7 $\pm$ 2.7 a	0.66 $\pm$ 0.03 c	0.28 $\pm$ 0.02 a
W2F3	13.40 $\pm$ 0.89 c	298.8 $\pm$ 11.4 a	203.9 $\pm$ 12.9 c	0.73 $\pm$ 0.02 a	0.29 $\pm$ 0.03 a
W3F1	13.44 $\pm$ 0.63 c	228.4 $\pm$ 7.6 c	133.3 $\pm$ 2.5 f	0.62 $\pm$ 0.01 d	0.20 $\pm$ 0.01 d
W3F2	19.60 $\pm$ 1.17 a	245.2 $\pm$ 14.7 bc	245.0 $\pm$ 8.5 b	0.66 $\pm$ 0.03 c	0.24 $\pm$ 0.02 bc
W3F3	15.66 $\pm$ 0.10 b	256.1 $\pm$ 13.7 b	264.3 $\pm$ 16.8 b	0.71 $\pm$ 0.01b	0.27 $\pm$ 0.01 ab
结果盛期 Fruit flourish stage					
W1F1	15.43 $\pm$ 0.67 f	308.6 $\pm$ 7.3 b	117.4 $\pm$ 10.2 e	1.17 $\pm$ 0.06 bcd	0.39 $\pm$ 0.02 bcd
W1F2	24.18 $\pm$ 0.05 cd	337.5 $\pm$ 9.8 a	129.1 $\pm$ 8.9 e	1.28 $\pm$ 0.09 abc	0.43 $\pm$ 0.03 abc
W1F3	19.75 $\pm$ 1.02 e	317.4 $\pm$ 9.5 b	131.9 $\pm$ 17.0 e	1.25 $\pm$ 0.04 abc	0.42 $\pm$ 0.01 abc
W2F1	27.98 $\pm$ 0.07 a	334.6 $\pm$ 4.1 a	180.5 $\pm$ 8.8 d	1.16 $\pm$ 0.06 bcd	0.39 $\pm$ 0.02 bcd
W2F2	26.78 $\pm$ 0.92 ab	344.6 $\pm$ 4.5 a	367.7 $\pm$ 7.8 a	1.34 $\pm$ 0.15 ad	0.45 $\pm$ 0.05 ab
W2F3	22.92 $\pm$ 0.17 d	339.0 $\pm$ 7.6 a	296.0 $\pm$ 26.7 b	1.39 $\pm$ 0.27 a	0.46 $\pm$ 0.09 a
W3F1	19.67 $\pm$ 1.23 e	290.6 $\pm$ 2.5 c	238.1 $\pm$ 6.8 c	1.01 $\pm$ 0.06 d	0.34 $\pm$ 0.02 d
W3F2	25.45 $\pm$ 0.51 bc	339.2 $\pm$ 6.4 a	281.4 $\pm$ 20.5 b	1.09 $\pm$ 0.09 cd	0.36 $\pm$ 0.03 cd
W3F3	16.64 $\pm$ 0.96 f	319.0 $\pm$ 8.1 b	293.9 $\pm$ 23.4 b	1.20 $\pm$ 0.01 abcd	0.40 $\pm$ 0.01 abcd
结果末期 Later fruiting stage					
W1F1	23.99 $\pm$ 0.55 de	279.2 $\pm$ 8.5 de	101.7 $\pm$ 5.2 e	1.07 $\pm$ 0.08 ab	0.35 $\pm$ 0.01 e
W1F2	27.29 $\pm$ 1.55 c	296.4 $\pm$ 2.5 bc	108.7 $\pm$ 4.4 de	1.13 $\pm$ 0.07 a	0.49 $\pm$ 0.04 a
W1F3	28.20 $\pm$ 0.58 c	309.0 $\pm$ 6.6 a	124.6 $\pm$ 2.5 bcd	1.10 $\pm$ 0.08 a	0.43 $\pm$ 0.01 b
W2F1	28.47 $\pm$ 1.95 c	287.9 $\pm$ 10.0 cd	117.3 $\pm$ 5.9 cde	1.12 $\pm$ 0.03 a	0.37 $\pm$ 0.02 de
W2F2	33.80 $\pm$ 1.52 b	283.9 $\pm$ 4.9 de	130.9 $\pm$ 10.2 bc	1.07 $\pm$ 0.03 ab	0.40 $\pm$ 0.02 bc
W2F3	36.89 $\pm$ 0.72 a	304.7 $\pm$ 3.2 ab	108.2 $\pm$ 7.5 de	0.90 $\pm$ 0.04 d	0.32 $\pm$ 0.02 f
W3F1	22.07 $\pm$ 1.63 e	274.1 $\pm$ 5.4 e	134.1 $\pm$ 18.4 abc	0.92 $\pm$ 0.02 cd	0.37 $\pm$ 0.01 de
W3F2	26.72 $\pm$ 0.39 cd	275.2 $\pm$ 8.8 e	151.8 $\pm$ 23.5 a	1.00 $\pm$ 0.02 bc	0.39 $\pm$ 0.01 cd
W3F3	29.30 $\pm$ 1.51 c	296.3 $\pm$ 8.4 bc	140.8 $\pm$ 7.4 ab	0.76 $\pm$ 0.04 e	0.31 $\pm$ 0.02 f

注 (Note): 同列数据后不同字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著 Values followed by different small letters in the same column are significant at 0.05 level.

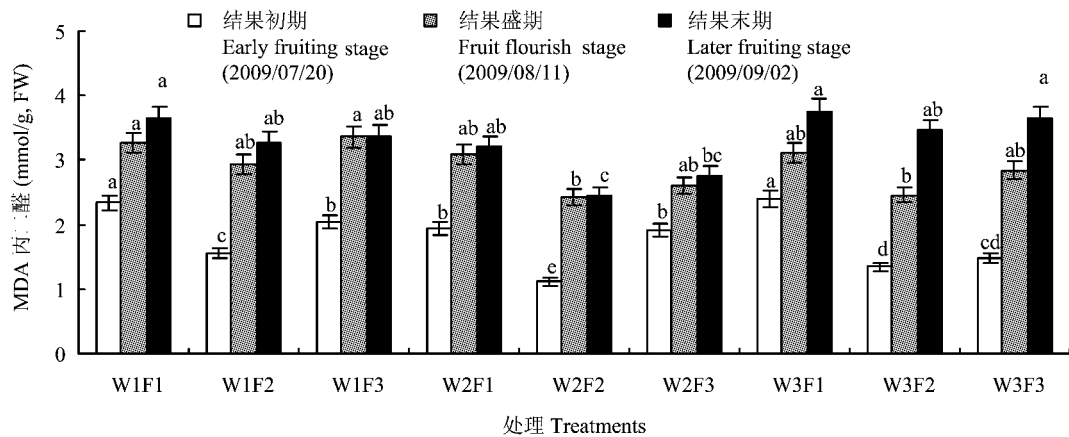


图2 番茄结果期叶片丙二醛含量对水肥水平的响应

Fig.2 Responses of soil water and fertilization to leaf MDA of tomato during the fruiting stage

[注(Notes): 图中柱上不同字母表示处理间在0.05水平上差异显著]

Different letters above the bars mean significant difference at 0.05 level.]

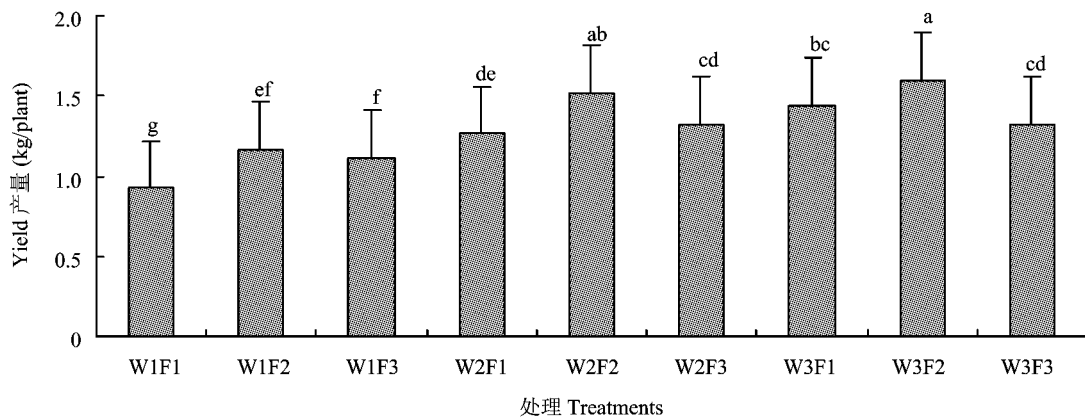


图3 番茄果实单株产量对水肥水平的响应

Fig.3 Responses of soil water and fertilization to yield per tomato fruit

[注(Notes): 图中柱上不同字母表示处理间在0.05水平上差异显著]

Different letters above the bars mean significant difference at 0.05 level.]

3.2 不同水肥水平对番茄叶片膜保护酶系统及叶绿素含量的影响

生物体衰老过程是活性氧代谢失调与累积的过程,氧自由基伤害直接影响到植物衰老进程,而SOD、POD等保护酶类在植物体内协同作用,能够清除过量的活性氧,维持活性氧的代谢平衡,保护膜结构,从而延缓衰老^[23]。在逆境胁迫条件下,脯氨酸在调节细胞质渗透势的同时还保护蛋白质分子,增加蛋白质分子的水合度,维持光合活性以及作为活性氧的清除剂^[24]。有研究表明,水分胁迫下夏玉米的SOD、POD活性显著降低^[17],适量的氮肥可提高功能叶中抗氧化酶活性,维护叶片光合机能^[25]。本试验结果表明,结果前期和盛期,W2和F2处理提高了叶片的POD、SOD活性和脯氨酸含量;结果末

期,在相同的土壤相对含水量下,施肥量的增加能提高叶片的SOD、POD活性和脯氨酸含量;在相同肥料水平下,W2处理的POD活性最高,SOD活性在W1处理最高,而脯氨酸含量则在W3处理最高,其原因可能是由于结果末期植株根系吸水能力变弱,脯氨酸含量在W3处理下积累,是胁迫的结果^[24],但还有待进一步研究。另外,在整个结果期,叶片SOD活性、脯氨酸含量呈先升后降的趋势,叶片POD活性逐渐升高。表明SOD在结果前期表现出较高的活性,POD活性和脯氨酸含量则在结果盛期开始升高的;结果末期,SOD活性下降,而POD活性继续升高,有效地消除了活性氧而延缓叶片衰老。

植物在逆境(或衰老)下遭受伤害与活性氧积累诱发的膜脂过氧化作用密切相关。MDA是膜质

表3 番茄结果期果实品质与叶片保护酶及叶绿素的相关性(r 值)分析
Table 3 Correlation (r) analysis of fruit quality and leaf protective enzyme systems, chlorophyll of tomato during the fruiting stage

日期 Date (m-d)	项目 Item	过氧化物酶 POD	超氧化物歧化酶 SOD	脯氨酸 Proline	叶绿素 a Chl. a	叶绿素 b Chl. b	丙二醛 MDA
07-20	维生素 C Vc	-0.52**	0.08	-0.10	-0.29	-0.05	0.15
	可溶性糖 Soluble sugar	-0.22	0.47*	-0.07	-0.20	0.14	-0.29
	可溶性蛋白 Soluble protein	-0.16	0.55**	0.15	0.02	0.38	-0.36
	有机酸 Organic acid	-0.32	0.14	-0.21	-0.53**	-0.13	-0.05
	游离氨基酸 Free amino acid	0.43*	0.18	0.65**	0.49**	0.43*	-0.50**
08-11	维生素 C Vc	0.27	0.34	-0.30	0.61**	0.40*	0.22
	可溶性糖 Soluble sugar	-0.19	0.02	-0.68**	0.35	0.09	0.41*
	可溶性蛋白 Soluble protein	0.20	0.28	0.07	0.18	0.04	-0.01
	有机酸 Organic acid	0.11	0.30	-0.59**	0.32	0.10	0.15
	游离氨基酸 Free amino acid	0.87**	0.56**	0.59**	0.02	0.00	-0.66**
09-02	维生素 C Vc	0.40*	0.56**	-0.57**	0.27	0.22	-0.29
	可溶性糖 Soluble sugar	-0.35	0.08	-0.42*	0.82**	0.62**	0.05
	可溶性蛋白 Soluble protein	0.56**	-0.08	0.49**	-0.37	-0.52**	-0.50**
	有机酸 Organic acid	-0.14	-0.17	-0.50**	0.58**	-0.01	-0.03
	游离氨基酸 Free amino acid	0.74**	0.09	-0.06	0.11	-0.27	-0.84**

注(Note): ** 表示极显著相关($P < 0.01$) Indicates highly significant correlation at a level of $P < 0.01$; * 表示显著相关($P < 0.05$) Indicates significant correlation at a level of $P < 0.05$.

过氧化最重要的产物之一,用来表示细胞膜脂过氧化程度和对逆境反应的强弱^[19]。纵观整个结果期,叶片 MDA 含量不断积累,膜脂过氧化程度逐渐加重,W2F2 处理下叶片的 MDA 含量低于其他处理,细胞膜脂过氧化程度最轻,延缓叶片衰老,植株正常生长。

叶绿素是重要的光合作用物质,叶绿素含量的多少在一定程度上反映了植物光合作用的强度和能力的低,从而影响植物的生长^[26]。因为氮素是植

物体内叶绿素的重要组成部分,在高氮水平下,碳水化合物大量用于合成叶绿素^[27]。本研究结果显示,F2 提高了叶绿素含量,植株生长茁壮、叶片浓绿;在结果前期和盛期随着土壤相对含水量的增加,叶绿素含量表现为先升后降的趋势,可能是在水分胁迫下,大部分叶绿体变圆,基粒片层和基质片层弯曲,类囊体和叶绿体膜模糊不清或解体,叶绿素生物合成减弱^[28],导致其含量下降。在结果末期,由于土壤长期处于较高水分状态下,根系活力低,叶绿素

含量低,W1 处理反而有利于提高叶绿素含量。

3.3 番茄果实品质与叶片保护酶及叶绿素的相关性分析

果实品质与叶片保护酶及叶绿素含量的相关性随生育期的不同而变化。果实品质与叶片 SOD 活性总体上呈正相关,而与 POD 活性在结果前期呈负相关,在结果盛期和末期总体上呈正相关,这可能是由于 SOD 在结果前期和盛期活性高,而 POD 在结果盛期和末期活性较高,两者相互协同清除体内过多的活性氧,维持植株正常的生理代谢,促进了有机物的生产^[16]。果实品质与 MDA 含量呈负相关,而与叶绿素含量呈正相关,说明在逆境胁迫下,自由基大量积累,导致低级产物 MDA 含量增加,膜脂过氧化程度加重,不利于光合有机物的生产;而叶绿素含量的增加,有利于植株捕获和传递更多的光能,提高光合速率,增加光合产物的生产和向库的运输,提高果实品质。果实中的游离氨基酸含量与叶片 POD、SOD 活性、脯氨酸和叶绿素含量均呈正相关,而与 MDA 含量呈极显著负相关,表明果实中的游离氨基酸与叶片保护酶及叶绿素协同作用,抵抗逆境胁迫,使植株正常生长,提高果实品质。

综合以上结果,在本试验条件下,番茄结果期较科学合理的水肥组合为 70%~80% 的土壤相对含水量和 N 0.267 g/kg 及 P₂O₅ 0.187 g/kg 的施肥量。

参 考 文 献:

- [1] 吴琦,张希明. 水分条件对梭梭气体交换特性的影响[J]. 干旱区研究,2005,22(1): 79-84.
Wu Q, Zhang X M. Effects of moisture conditions on the gas exchange of *Haloxylon ammodendron*[J]. Arid Zone Res., 2005, 22(1): 79-84.
- [2] 于红梅,李子忠,龚元石. 传统和优化水氮管理对蔬菜地土壤氮素损失与利用效率的影响[J]. 农业工程学报,2007,23(2): 54-59.
Yu H M, Li Z Z, Gong Y S. Comparison of nitrogen loss and use efficiency of vegetable in vegetable field under traditional and improved water and N-fertilizer management [J]. Trans. CSAE, 2007, 23(2): 54-59.
- [3] Yasuyoshi H T, Toshiko T B, Satoru K D *et al.* The effect of water stress on the growth, sugar and nitrogen content of cherry tomato fruit[J]. Jpn. Soc. Hort. Sci., 1998, 67(5): 759-766.
- [4] 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.
- [5] 夏秀波,于贤昌,高俊杰. 水分对有机基质栽培番茄生理特性、品质及产量的影响[J]. 应用生态学报,2007,18(12): 2710-2714.
- [6] Xia X B, Yu X C, Gao J J. Effects of moisture content in organic substrate on the physiological characters, fruit quality and yield of tomato plant[J]. Chin. J. Appl. Ecol., Dec. 2007, 18(12): 2710-2714.
- [7] 张国红,袁丽萍,郭英华,等. 不同施肥水平对日光温室番茄生长发育的影响[J]. 农业工程学报,2005,21(增刊): 151-153.
Zhang G H, Yuan L P, Guo Y H *et al.* Effects of fertilization levels on the growth and development of tomato in solar greenhouse [J]. Trans. CSAE, 2005, 21(Suppl.): 151-153.
- [8] 虞娜,张玉龙,张玉玲,等. 灌溉和施肥对温室番茄产量和品质影响效应的研究[J]. 中国土壤与肥料,2009,(4): 31-35.
Yu N, Zhang Y L, Zhang Y L *et al.* Effects of fertilization levels on the growth and development of tomato in solar greenhouse [J]. Soil Fert. Sci. China, 2009, (4): 31-35.
- [9] 任华中. 水氮供应对日光温室番茄生育、品质及土壤环境的影响[D]. 中国农业大学,2003. 21-24.
Ren H Z. Impact of different irrigation and nitrogen levels on growth, development, quality and soil environment of solar-greenhouse tomato [D]. China Agricultural University, 2003. 21-24.
- [10] 刘瑞显,王友华,陈兵林,等. 花铃期干旱胁迫下氮素水平对棉花光合作用和叶绿素荧光特性的影响[J]. 作物学报,2008,34(4): 675-683.
Liu R X, Wang Y H, Chen B L *et al.* Effects of nitrogen levels on photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics under drought stress in cotton flowering and boll-forming stage[J]. Acta Agron. Sin., 2008, 34(4): 675-683.
- [11] 齐永青,肖凯,李雁鸣. 作物在渗透胁迫下脯氨酸积累的研究进展[J]. 河北农业大学学报,2003,26(增刊): 24-27.
Qi Y Q, Xiao K, Li Y M. Research progress on accumulation of proline under osmotic stress in crops[J]. J. Agric. Univ. Hebei, 2003, 26(Suppl.): 24-27.
- [12] Xu D P, Duan X L, Wang B Y *et al.* Expression of a late embryogenesis abundant protein gene, HVA7, from barley confers tolerance to water deficit and salt stress in transgenic rice[J]. Plant Physiol, 1996, 110: 249-257.
- [13] 蒋明义,杨文英,徐江,等. 渗透胁迫诱导水稻幼苗的氧化伤害[J]. 作物学报,1994,20(6): 733-738.
Jiang M Y, Yang W Y, Xu J *et al.* Osmotic stress-induced oxidative injury of rice seedlings[J]. Acta Agron. Sin., 1994, 20(6): 733-738.
- [14] 孙群,梁宗锁,王渭玲,等. 氮对水分亏缺下玉米幼苗膜脂过氧化及光合速率的影响[J]. 西北农业学报,2001,10(1): 7-10.
Sun Q, Liang Z S, Wang W L *et al.* Effects of mechanism lipid peroxidation and photosynthesis rate on water stress under different nitrogen level in maize [J]. Acta Agric Bor. Occid. Sin., 2001, 10(1): 7-10.
- [15] 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 appli-

- cation on yields and quality of tomato in solar greenhouse[J]. China Veget., 1997, (4): 10-13.
- [15] 王丽英, 张彦才, 翟彩霞, 等. 平衡施肥对连作日光温室黄瓜产量、品质及土壤理化性状的影响[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(6): 1375-1383.
- Wang L Y, Zhang Y C, Zhai C X *et al.* Effect of balanced fertilization on yield and quality of sunlight greenhouse cucumber and soil characteristics under continuous cropping[J]. Chin. J. Eco-Agric., 2008, 16(6): 1375-1383.
- [16] 葛体达, 隋方功, 白莉萍, 等. 水分胁迫下夏玉米根叶保护酶活性变化及其对膜脂过氧化作用的影响[J]. 中国农业科学, 2005, 38(5): 922-928.
- Ge T D, Sui F G, Bai L P *et al.* Effects of water stress on the protective enzyme activities and lipid peroxidation in roots and leaves of summer maize[J]. Sci. Agric. Sin., 2005, 38(5): 922-928.
- [17] 李立新, 李生秀. 氮、钾、甜菜碱对水分胁迫下夏玉米叶片膜脂过氧化和保护酶活性的影响[J]. 作物学报, 2007, 33(3): 482-490.
- Li L X, Li S X. Effects of nitrogen, potassium and glycinebetaine on the lipid peroxidation and protective enzyme activities in water-stressed summer maize[J]. Acta Agron. Sin., 2007, 33(3): 482-490.
- [18] 徐福利, 梁银丽, 陈志杰, 等. 延安市日光温室蔬菜施肥现状与环境效应[J]. 西北植物学报, 2003, 23(5): 797-801.
- Xu F L, Liang Y L, Chen Z J *et al.* The study of fertilizer application and its effect to environment in sunlight greenhouse in Yan'an[J]. Acta Bot. Bor.-Occid. Sin. 2003, 23(5): 797-801.
- [19] 高俊凤. 植物生理学试验技术[M]. 西安: 世界图书出版公司, 2000.
- Gao J F. Plant physiology laboratory technology[M]. Xi'an: World Publishing Corporation, 2000.
- [20] 赵凤艳, 魏自民, 陈翠玲. 氮肥用量对蔬菜产量和品质的影响[J]. 农业系统科学与综合研究, 2001, 17(1): 43-44.
- Zhao F Y, Wei Z M, Chen C L. The effect of N application rate on yield and quality of vegetable[J]. Syst. Sci. Compreh. Stud. Agric., 2001, 17(1): 43-44.
- [21] 刘玉梅, 于贤昌, 姜建辉. 不同施氮水平对嫁接和自根黄瓜品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(5): 706-710.
- Liu Y M, Yu X C, Jiang J H *et al.* Effects of nitrogen fertilization on quality of self-rooted and grafted cucumber[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2006, 12(5): 706-710.
- [22] 徐坤范, 艾希珍, 张晓慧, 等. 氮素水平对日光温室黄瓜品质的影响[J]. 西北农业学报, 2005, 14(1): 162-166.
- Xu K F, Ai X Z, Zhang X H *et al.* Effect of nitrogen levels on quality of cucumber in solar greenhouse[J]. Acta Agri. Bor.-Occid. Sin., 2005, 14(1): 162-166.
- [23] Liang Y C, Chen Q, Liu Q *et al.* Exogenous silicon (Si) increases antioxidant enzyme activity and reduces lipid peroxidation in roots of salt-stressed barley (*Hordeum vulgare L.*) [J]. J. Plant Physiol., 2003, 160: 1157-1164.
- [24] 朱虹, 祖元刚, 王文杰, 阎永庆. 逆境胁迫条件下脯氨酸对植物生长的影响[J]. 东北林业大学学报, 2009, 37(4): 86-89.
- Zhu H, Zu Y G, Wang W J, Yan Y Q. Effect of proline on plant growth under different stress conditions[J]. J. Northeast For. Univ., 2009, 37(4): 86-89.
- [25] 姜照伟, 林文雄, 李义珍, 等. 不同氮肥施用量对再生稻若干生理特性的影响[J]. 福建农业学报, 2005, 20(3): 168-171.
- Jiang Z W, Lin W X, Li Y Z *et al.* Effects of nitrogen fertilizer rates on some physiological characteristics of ratoon rice[J]. Fujian J. Agric. Sci., 2005, 20(3): 168-171.
- [26] 刘世鹏, 曹娟云, 刘冲, 等. 水分胁迫对绿豆幼苗渗透调节物质的影响[J]. 延安大学学报, 2008, 27(1): 55-58.
- Liu S P, Cao J Y, Liu C *et al.* Effect of water stress on adjusting osmotic substance of mung seedling[J]. J. Yan'an Univ. (Nat. Sci. Ed), 2008, 27(1): 55-58.
- [27] 焦自高, 王嵩启, 董玉梅, 等. 嫁接对黄瓜生长及品质的影响[J]. 山东农业科学, 2000, (1): 26-28.
- Jiao Z G, Wang S Q, Dong Y M *et al.* Effect of grafting on the growth and quality of cucumber[J]. Shandong Agric. Sci., 2000, (1): 26-28.
- [28] 付秋实, 李红岭, 崔健, 等. 水分胁迫对辣椒光合作用及相关生理特性的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(5): 1859-1866.
- Fu Q S, Li H L, Cui J *et al.* Effects of water stress on photosynthesis and associated physiological characters of capsicum *annuum L.* [J]. Sci. Agric. Sin., 2009, 42(5): 1859-1866.