

施肥胁迫对温室番茄不同生长期表型数据的影响

王丽燕¹ 朱梦婷¹ 李莉¹ 王海华^{1,2}

(1. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 农业部农业物联网重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为了研究不同水肥策略对温室番茄长势的影响, 试验选择常见的适合温室种植的小番茄(彩玉)为研究对象, 以不同配比的水溶性肥, 设置了4种施水肥水平。试验过程中, 分别采集4种水肥条件下的番茄株高、株径、茎节数、花序数和果实参数等表型数据。采用ANOVA单因素分析方法, 对试验数据进行对比分析。不同配比水肥对番茄长势存在显著差异。其中, 高施肥水平(IV)能够得到最佳产量。而中等水肥(III)长势最佳, 具有最大单果质量, 且与不施肥和较少量施肥相比, 其长势和果实产量优势明显, 经济效益显著。对果实数、株高、茎节数、花序数和产量进行多因素回归分析, 决定系数 R^2 为0.965, 其差异显著性顺序依次为果实数、株高、茎节数和花序数。试验结果表明, 中等水肥配比下, 表型数据的自动采集和分析能够对温室番茄水肥一体化设备灌溉策略的制定提供参考。

关键词: 温室; 番茄; 施肥水平; 长势; 作物表型

中图分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)S0-0321-06

Influence of Different Fertilization on Phenotypic Data of Greenhouse Tomato in all Growth Periods

WANG Liyan¹ ZHU Mengting¹ LI Li¹ WANG Haihua^{1,2}

(1. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Agricultural Internet of Things, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Phenotypic data of plant can reflect the growing of crops, which is one of great significance to guide the integrated water management. In order to study the effect of different fertilization strategy on growth of greenhouse tomato, the common small tomato (Jade) was selected as the research object due to suitable for greenhouse planting. Four kinds of different ratios of water soluble fertilizer were set up to affect the tomato growing. During the test, phenotypic parameters of tomato were collected respectively under the different fertilization levels, including plant height, stalk diameter, number of internodes, number of inflorescence, fruit production and so on. ANOVA single factor analysis method was conducted to analyze the experimental data. The results show that tomatoes with different ratios of fertilization have significant differences. Among which, the tomato plants with high fertilization level get the best production, and normal fertilization level is fit to plant growing with the largest single fruit weight and remarkable economic benefit. At the same time, the growth and fruit yield are more obviously distinguish than the relatively small amounts of fertilizer and no fertilizer. The multiple factors regression with fruit number, height, number of internodes, number of inflorescence and yield were introduced to analysis parameters effective and the best determination coefficient R^2 is 0.965. The significant differences order is fruit number, plant height and number of internodes, number of inflorescent. The results of experiment show that the normal level of fertilization is best for growing, and the phenotypic data can provide reference for the establishment of irrigation strategies of the greenhouse tomato growing with fertilization equipment.

Key words: greenhouse; tomato; fertilization levels; growing condition; plant phenotypic

收稿日期: 2017-07-16 修回日期: 2017-11-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(31301240)和农业部农业物联网重点实验室开放基金项目(2017AIOT-02)

作者简介: 王丽燕(1994—), 女, 硕士生, 主要从事农业信息化研究, E-mail: wangliyan@cau.edu.cn

通信作者: 王海华(1976—), 男, 副教授, 博士, 主要从事农业信息化研究, E-mail: whaihua@cau.edu.cn

引言

设施园艺是现代化农业生产的一个重要组成部分。我国的设施园艺正在快速发展,在现代农业生产物科学技术、工程科学技术及系统管理科学技术的引领下,通过水肥等资源高效利用,设施园艺效益显著增加。我国水资源短缺,而农业用水需求量占比大,尤其是作为设施生产重要部分的蔬菜种植,水肥消耗更大^[1]。因此,设施蔬菜种植的水肥合理利用成为了农业科技中的重要发展方向。特别是水肥一体化灌溉方式首先在欧美等发达国家得到广泛应用^[2-5],到20世纪90年代,开始在我国逐步推广。相对于我国传统农业肥大水勤粗放型的施肥灌溉方式,水肥一体化可根据土壤性状、作物生长及水肥需求规律精确调控土壤水分和养分^[6],通过自动化灌溉系统精细化施肥浇水,在给作物施加水分的同时施加养分,能更高效利用水肥资源,节约成本,省肥省水,使用方便^[7]。因此,水肥一体化是现代农业生产健康科学发展的有力保障。但是,由于在果蔬类作物种植中,因其种类繁多,生长环境不同,水肥要求各异,因此实现水肥一体化设备自动灌溉,研究特定环境下不同水肥条件下的作物长势是首要任务^[8]。

作物长势一般指作物的生长状况与趋势,用来描述作物长势的特征参数可以分为个体特征参数、群体特征参数和综合参数3个方面。其中,个体特征参数包括株高、茎粗、叶片数量、形状、颜色等,群体特征参数包括种植密度、株距、行距等,综合特征参数指叶面积指数^[9-10],而表型指具有特定基因型的个体在一定环境条件下表现出来的性状特征的总和^[11-12],因此在农作物生长过程中对其表型信息进行采集,了解其长势情况,可为管理决策提供依据^[13]。

番茄是设施种植最为广泛的蔬菜作物,需水量很大,根系发达,耐旱性好^[14]。目前关于灌溉施肥的研究很多^[15-23],但主要集中于以番茄产量和品质为目标的水肥耦合研究上,多数还是基于作物经验模型,即按经验给出水肥配方,同时监控水肥和产量的关系。以上研究没有实际分析各个阶段水肥对植物长势的影响,还不能真正满足作物的水肥需求,对植物表型的相关研究也比较少。本文研究施肥胁迫对表型数据的影响,优化水肥配比,以期为实现基于作物长势反馈的水肥调控模式奠定基础。

1 材料与试验方法

1.1 试验材料与试验方法

试验采用的番茄品种为彩玉,植株为无限生长类型,果型为圆形,成熟果为粉红色底面上嵌有金黄

条纹,果皮厚、韧性好、不易裂果,口感好。试验地点为中国农业大学信息与电气工程学院楼顶日光温室。采用种植槽方式定植,槽中放置通用型育苗基质。种植行距和株间距均为20 cm。因受限于温室面积,试验共选择27棵植株做为研究对象。水肥管理方面,按不同生长阶段,春、夏季分别设置了4种不同水平的水肥灌溉量,具体如表1所示。肥料为中农金旺(北京)农业工程技术有限公司提供的茄果类肥,施加肥液成分比例为1 t水和表2元素成分混合配比。

表1 种植施肥水平

Tab.1 Planting fertilizer level

施肥水平	春季施肥量/ (L·棵 ⁻¹)	夏季施肥量/ (L·棵 ⁻¹)	每个水平 种植棵数/棵
I	0.2(水)	0.4(水)	5
II	0.1(肥液)	0.2(肥液)	7
III	0.2(肥液)	0.4(肥液)	9
IV	0.4(肥液)	0.6(肥液)	6

表2 肥料成分

Tab.2 Fertilizer elements

大量元素		微量元素	
名称	质量/g	名称	质量/g
Ca(NO ₃) ₂	900	EDTA-2NaFe	30
KNO ₃	650	H ₃ BO ₃	2.86
MgSO ₄	375	MnSO ₄ ·4H ₂ O	2.13
KH ₂ PO ₄	100	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0.22
NH ₃ H ₂ PO ₄	50	CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.08
		(NH ₄) ₆ MO ₇ O ₂₄ ·CuSO ₄ ·4H ₂ O	0.02

1.2 试验方法

2017年2月27日定植蕃茄苗,每隔1~2 d浇一次水肥。4月26日前采用春季施肥量,之后采用夏季施肥量。试验过程中无病虫害胁迫。生长过程中,定期剪枝,只留主干,果实自由生长。定植3周后每周测一次单棵植株的表型数据,连续监测12周。在采收果实前为无破坏地测量,测量的指标包含:株高、株径、茎节数、花序数、果实数。采收后每棵植株随机选取2个果实测量果实横纵径、甜度、单果质量,并记录单株坐果量。株高采用直尺测量植株根基部到生长点的高度。因受温室高度条件限制,植株高度达取1.30 m后需要掐尖打顶。株径、果实横纵径采用游标卡尺测量,其中株径测量位置位于离土壤平面高15 cm处的茎秆;果实甜度测量采用PX-B50T型果实糖度计。

2 试验结果与分析

2.1 水肥胁迫对番茄植株生长的影响

采用AVONA单因素进行方差分析和Duncan

新复极差法进行多重比较,从施肥水平差异对番茄各指标影响的差异显著性分析看(表3),总体株高无显著差异,株径在结果期和果实成熟期有明显差

异,体现为水平IV和I较优,II最瘦弱。茎节数在整个生长期都有明显差异,4个水平明显分为2个层次,IV和III茎节数比较多,花序数总体没什么显著差异。

表3 不同时期施肥胁迫对番茄表型数据影响的差异显著性分析

Tab. 3 Difference of influence of fertilization stress on tomato phenotype data during different periods

指标	施肥水平	03-16	03-23	03-30	04-06	04-13	04-20	04-27	05-04	05-11	05-18	05-25	06-01
株高	I	34.22 ^a	42.71 ^a	49.75 ^a	64.69 ^a	82.60 ^a	89.38 ^a	101.14 ^a	117.91 ^a	126.82 ^a	129.38 ^a	130.78 ^a	138.06 ^a
	II	34.79 ^a	42.51 ^a	53.01 ^a	67.28 ^a	85.21 ^a	96.07 ^a	100.68 ^a	113.81 ^a	119.93 ^a	126.26 ^a	128.77 ^a	133.46 ^a
	III	37.96 ^a	46.35 ^a	53.62 ^a	69.68 ^a	85.14 ^a	95.83 ^a	104.53 ^a	118.79 ^a	127.97 ^a	132.70 ^a	133.88 ^a	134.98 ^a
	IV	35.78 ^a	42.10 ^a	49.55 ^a	67.48 ^a	83.68 ^a	92.51 ^a	97.10 ^a	106.67 ^a	113.39 ^a	121.90 ^a	123.90 ^a	127.65 ^a
株径	I	5.90 ^a	7.46 ^a	7.51 ^a	8.16 ^a	8.37 ^a	8.99 ^a	9.94 ^a	9.00 ^a	9.65 ^a	9.34 ^{ab}	10.18 ^{ab}	10.05 ^a
	II	5.77 ^a	7.03 ^a	7.21 ^a	8.31 ^a	8.23 ^a	8.73 ^a	9.26 ^a	8.52 ^a	8.40 ^a	8.21 ^b	8.60 ^a	9.58 ^a
	III	6.64 ^a	7.73 ^a	8.11 ^a	8.58 ^a	8.68 ^a	8.87 ^a	9.36 ^a	8.45 ^a	8.82 ^a	9.84 ^{ab}	9.59 ^{ab}	9.29 ^a
	IV	6.43 ^a	7.92 ^a	8.41 ^a	8.37 ^a	9.19 ^a	8.89 ^a	10.31 ^a	9.87 ^a	9.71 ^a	10.07 ^a	11.10 ^a	11.01 ^a
茎节数	I	7 ^b	10 ^b	12 ^b	15 ^b	18 ^b	20 ^b	22 ^{ab}	25 ^{ab}	27 ^{ab}	28 ^{ab}	29 ^b	30 ^{ab}
	II	8 ^{ab}	10 ^{ab}	13 ^{ab}	15 ^b	18 ^b	20 ^b	21 ^a	23 ^b	25 ^b	27 ^b	28 ^b	29 ^b
	III	10 ^a	12 ^a	15 ^a	18 ^a	21 ^a	23 ^a	25 ^b	27 ^a	30 ^a	30 ^a	31 ^{ab}	31 ^{ab}
	IV	9 ^{ab}	12 ^{ab}	15 ^{ab}	17 ^{ab}	21 ^a	22 ^{ab}	24 ^{ab}	26 ^{ab}	29 ^a	31 ^a	33 ^a	34 ^a
花序数	I	1 ^a	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^{ab}	6 ^a	7 ^a	7 ^a	7 ^a
	II	1 ^a	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	4 ^a	5 ^a	5 ^b	6 ^a	7 ^a	6 ^a	7 ^a
	III	1 ^a	1 ^a	3 ^a	3 ^a	4 ^a	4 ^a	5 ^a	5 ^{ab}	7 ^a	7 ^a	8 ^a	6 ^a
	IV	1 ^a	1 ^a	3 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	6 ^a	7 ^a	7 ^a	7 ^a	8 ^a
果实数	I			0 ^a	0 ^a	0 ^a	2 ^{ab}	4 ^b	7 ^{ab}	9 ^{ab}	10 ^{ab}	11 ^{ab}	13 ^{ab}
	II			0 ^a	0 ^a	0 ^a	1 ^b	2 ^b	3 ^b	4 ^c	4 ^c	4 ^c	7 ^b
	III			0 ^a	0 ^a	0 ^a	1 ^b	3 ^b	4 ^b	5 ^{bc}	5 ^{bc}	6 ^{bc}	8 ^b
	IV			0 ^a	0 ^a	0 ^a	4 ^a	8 ^a	10 ^a	12 ^a	13 ^a	15 ^a	18 ^a

注:同列不同的小写字母表示不同处理之间的差异显著,相同字母代表差异不显著。字母根据均值从大到小排列,下同。表中茎节数、花序数、果实数为四舍五入的结果。

(1) 对番茄株高的影响

根据表3中株高对比数据分析,4个施肥水平株高总趋势一致,到番茄生长期无明显区别,曲线接近重叠。到结果期初期开始有差异,果实成熟期4个水平植株生长速率趋于平缓。从整体株高长势来看,水平III和水平I植株略高,II次之,IV最低,说明III整体长势最好。由不同施肥水平的株高差异显著性分析可得,株高在整个生长发育期对水肥胁迫反应不显著。

(2) 对番茄株径的影响

根据表3株径对比数据看出,4个施肥水平总趋势起伏不大,增长速度缓慢;番茄生长期比较泾渭分明,开花结果期曲线很多重叠,从整体株径长势高低来看,水平IV株径最为粗壮,生长期前期III次之,到开花结果期II和III重叠,果实成熟期I比III长势还好,从表中同一植株的起伏看出,人为测量株径误差大,株径增长率低。由不同施肥水平的株径差异显著性分析可得,株径在生长期前期差异显著。

(3) 对番茄茎节数的影响

根据表3茎节数对比数据看出,4个施肥水平

茎节数总趋势线性增长,而且差别不大,增长速度一致,和图1株高长势图表现很一致;4个水平2个量级,I和II茎节数差不多;III和IV也差不多,生长期和开花结果期几乎重叠;只有在果实成熟期III微高IV一些,而I和II开始重叠,从整体株径长势高低来看,水平III和IV长得更好一些。但4个水平差别不大,由不同施肥水平的茎节数差异显著性分析可得,茎节数在生长期前期差异显著。

(4) 对番茄花序数的影响

根据表3花序数对比数据看出,4个施肥水平茎节数前期差别不大,几乎重叠。开花结果期才开始出现起伏差异,从整体花序数高低来看,水平IV和III长得更好一些。但4个水平差别不大,重叠多,由不同施肥水平的花序数差异显著性分析可得,花序数在整个番茄生育期内差异不显著。

(5) 对番茄果实生长的影响

根据表3果实数对比数据看出,4个施肥水平果实数有差别,从整体来看,水平IV和II果实长得最多。水平I和水平III差别不大,重叠多,而且平均果实数比较少。由不同施肥水平的果实数差异显著性

分析可得,果实数在整个番茄结果期差异显著。

如表4所示,采用独立样本 t 检验对不同施肥水平果实的横径、纵径、果形指数、单果质量、单株产量和甜度进行样本方差分析。其中果形指数为横径比纵径^[24]。由表4可以看出,除了施肥水平I和II、III、IV果形指数有明显差异外,其他指标均差异不明显,但可以看出果实大部分呈圆形,III单果质量最大,单株产量是IV最大,I最少。甜度III最高。

表4 施肥胁迫对果实各指标影响的差异显著性分析

Tab.4 Difference of influence of fertilization stress on fruit

施肥水平	横径/mm	纵径/mm	果形指数	单果质量/g	单株产量/g	甜度
I	34.37 ^a	32.46 ^a	1.06 ^a	23.49 ^a	204.02 ^a	7.45 ^a
II	33.50 ^a	33.29 ^a	1.00 ^b	22.34 ^a	273.20 ^a	7.19 ^a
III	34.31 ^a	33.53 ^a	1.02 ^b	23.58 ^a	253.28 ^a	7.77 ^a
IV	33.80 ^a	33.43 ^a	1.01 ^b	22.99 ^a	289.11 ^a	7.53 ^a

2.2 各指标之间的关系分析

对果实成熟期时各指标数据进行 Pearson 相关度分析,以单株产量和甜度为目标。其中,果实数、株径、纵径、花序数和单株产量在 0.01 显著性水平上相关。单果质量、株高、果形指数、茎节数和单株

产量在 0.05 显著性水平上相关。果实数和株径在 0.01 显著性水平上和甜度相关。

由于果实数、株径、纵径、花序数和单株产量在 0.01 显著性水平上相关,研究对这几个指标先进行了回归分析^[25],再提取显著性指标,建立了回归模型。根据表5中对显著指标进行回归分析中得到的回归方程决定系数比较,得到最优回归方程为

$$Y = 25.546 + 24.561X_1 + 8.455X_2 - 1.631X_3 - 6.496X_4 \quad (1)$$

式中 Y ——单株产量 X_1 ——果实数

X_2 ——花序数 X_3 ——株高

X_4 ——茎节数

回归方程这4个自变量和单株产量因变量的回归分析显示其决定系数高,线性拟合度好,而且回归方程的回归系数假设检验方差差异显著。其差异显著性顺序为果实数大于株高和茎节数,再其次为花序数。果实数和株径在 0.01 显著性水平上和甜度相关,用这两项指标进行回归分析,结果决定系数 R^2 为 0.215,相关性极低,而且模型显著性指标项只有株径。由表4差异显著性分析可得,甜度差异都不显著,因此根据已有的数据难估计。

表5 回归分析系数

Tab.5 Regression analysis coefficient

决定系数 R^2	相关指标回归系数								
	常数项	果实数	株径	纵径	花序数	单果重	株高	果形指数	茎节数
0.943	-360.525	10.793	0	23.662	0	0	0	0	0
0.946	521.805	26.234	0	0	0.126	0	-1.997	0	-11.705
0.952	-152.216	24.351	0	8.399	0	0	0	0	8.752
0.965	25.546	24.561	0	0	8.455	0	-1.631	0	-6.496

2.3 讨论

虽然4个施肥水平在不同时期各个指标差异整体上不明显,但整体趋势可以看出,施肥水平III和施肥水平IV较施肥水平I和II优。从株高来看,4个不同水平在平均长势最大差达到10cm,III长得最好。试验结果表明不同施肥水平在不同时期对番茄长势有不同程度的影响。从株径来看,整体差异不大,平均株径最大差异在2mm左右。从茎节数来看,整体增长速率一致,III最优,III和IV略高于I和II 2个茎节数左右,平均茎节数最大差异在4个左右。从花序数来看,起伏较大,平均最大差为3个左右。从果实数来看,差异明显,IV最优,III次之,I和II比较低,说明水肥对于果实生长很有影响。从果实数据来看,各指标略有差异,结果显示III和I单果质量最大,单株产量却是IV最大,I最少。甜度III最高。总体上III和IV施肥水平对番茄生长发育比较有利,但从投入成本考虑,前者占优。

另一方面,通过结果分析还发现,有些指标人工测量误差太大,比如株径,由于测量位置选取难以固定的问题,会出现越长越瘦的情况,后期应该开发一个传感器用于株径的测量,减少人为误差。此外,4个施肥水平是处于南北4列前后不同水平分布的,因此光照强度上有差异,施肥水平I和IV是采光比较好的位置,对此试验结果会造成一定程度的影响,本试验只对温室整体进行光照检测,没有设置对照,无法进行分析。试验没有分析环境数据,除了光照差异较大外,CO₂浓度、空气温度、湿度均差别不大。

3 结论

(1)对不同施肥条件下温室番茄在不同生长期的表型数据进行了研究。试验结果表明,按表2的肥液配方,施肥水平III(春季施肥液0.2L/棵,夏季施肥液0.4L/棵)对番茄生长发育最有利。该施肥

水平番茄各项指标数据几乎都优于其他施肥水平的番茄,其株高、茎节数、单果质量、甜度均处于最优状态。

节数有线性相关关系,番茄单株产量的回归方程决定系数为 0.965。施肥水平Ⅲ下的番茄甜度最高,但是 4 个施肥水平甜度差异不显著,需要进一步研究。

(2) 番茄单株产量和果实数、花序数、株高、茎

参 考 文 献

- 袁洪波,程曼,庞树杰,等. 日光温室水肥一体灌溉循环系统构建及性能试验[J]. 农业工程学报,2014,30(12):72-78.
YUAN Hongbo, CHENG Man, PANG Shujie, et al. Construction and performance experiment of integrated water and fertilization irrigation recycling system[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(12): 72-78. (in Chinese)
- 李晓欣,胡春胜,陈素英. 控制灌水对华北高产区土壤硝态氮累积的影响[J]. 河北农业科学,2005,9(3):6-10.
LI Xiaoxin, HU Chunsheng, CHEN Suying. Effects of controlled irrigation on nitrate accumulation in North China[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2005, 9(3): 6-10. (in Chinese)
- 袁洪波. 日光温室封闭式栽培系统关键技术研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
YUAN Hongbo. Study on key technologies for closed cultivation systems in solar greenhouses [D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- 周博,周建斌. 不同水肥调控措施对日光温室土壤水分和番茄水分利用效率的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2009, 37(1): 211-216.
ZHOU Bo, ZHOU Jianbin. Effects of different fertilizers and water managements on water distribution in soil and water use efficiency of tomato [J]. Journal of Northwest A&F University: Nat. Sci. Ed., 2009, 37(1): 211-216. (in Chinese)
- 张乐森,王振华,孟凡山,等. 保护地大葱水肥一体化滴灌施肥应用研究[J]. 节水灌溉, 2013(11): 17-20, 24.
ZHANG Lesen, WANG Zhenhua, MENG Fanshan, et al. Integration of water and fertilization through drip fertigation for green Chinese onion in protected field[J]. Water Saving Irrigation, 2013(11): 17-20, 24. (in Chinese)
- 李友丽,李银坤,郭文忠,等. 有机栽培水肥一体化系统设计及试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 273-279. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s042&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.042.
LI Youli, LI Yinkun, GUO Wenzhong, et al. Design and test integrated water and fertilizer system in organic cultivation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 273-279. (in Chinese)
- 付强,梅树立,李莉,等. 水肥一体化智能调控设备智能液位开关设计[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(增刊): 108-115. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2015s019&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.S0.019.
FU Qiang, MEI Shuli, LI Li, et al. Intelligent switcher design in water and fertilizer integration equipment [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(Supp.): 108-115. (in Chinese)
- 杨林林,张海文,韩敏琦,等. 水肥一体化技术要点及应用前景分析[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(16): 23-25, 28.
YANG Linlin, ZHANG Haiwen, HAN Minqi, et al. Analysis of techniques and application prospect of water and fertilizer integration technology [J]. Journal of Anhui Agriculture Science, 2015, 43(16): 23-25, 28. (in Chinese)
- 杨邦杰,裴志远. 农作物长势的定义与遥感监测[J]. 农业工程学报, 1999, 15(3): 214-218.
YANG Bangjie, PEI Zhiyuan. Definition of crop condition monitoring using remotr sensing [J]. Transactions of the CSAE, 1999, 15(3): 214-218. (in Chinese)
- 李树强,孙红,张彦娥,等. 作物长势空间分析系统设计[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(11): 234-240. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20131140&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.11.040.
LI Shuqiang, SUN Hong, ZHANG Yan'e, et al. Development of crop growth spatial analysis system [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 234-240. (in Chinese)
- 潘映红. 论植物表型组和植物表型组学的概念与范畴[J]. 作物学报, 2015, 41(2): 175-186.
PAN Yinghong. On the concept and category of plant phenotype group and plant phenotype group [J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(2): 175-186. (in Chinese)
- 潘锐,熊勤学,张文英. 数字图像技术及其在作物表型研究中的应用研究进展[J]. 长江大学学报: 自然科学版, 2016, 21(1): 38-41, 46.
PAN Rui, XIONG Qinxue, ZHANG Wenying. Digital image technology and its application in crop phenotype research [J]. Journal of Yangze University: Natural Science Edition, 2016, 21(1): 38-41, 46. (in Chinese)
- 蒋普. 作物长势远程测量关键技术研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
JIANG Pu. Research on key technology for remote measurement of crop growth information [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014. (in Chinese)
- 原保忠,康跃虎. 番茄滴灌在日光温室室内耗水规律的初步研究[J]. 节水灌溉, 2000(3): 25-27, 40.
- 丁果. 温室蔬菜滴灌灌溉施肥水肥耦合效应的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2005.
DING Guo. Study of water and fertilizer coupling effect under drip fertigation in greenhouse vegetable [D]. Huhhot: Inner

- Mongolia Agricultural University, 2005. (in Chinese)
- 16 陈修斌,潘林,王勤礼,等. 温室番茄水肥耦合数学模型及其优化方案研究[J]. 南京农业大学学报, 2006, 29(3): 138-141.
CHEN Xiubin, PAN Lin, WANG Qinli, et al. Water fertilizer coupling effects and its optimization in greenhouse tomato production[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2006, 29(3): 138-141. (in Chinese)
- 17 杜清洁,李建明,潘铜华,等. 滴灌条件下水肥耦合对番茄产量及综合品质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(3): 10-17.
DU Qingjie, LI Jianming, PAN Tonghua, et al. The compound effects of water and fertilizer on yield and quality of tomato under drip irrigation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(3): 10-17. (in Chinese)
- 18 崔毅,陈思,柴瑞育,等. 番茄产量对各生育阶段土壤水分的响应分析[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(6): 14-21.
CUI Yi, CHEN Si, CHAI Ruiyu, et al. Responsive analysis of tomato yield to soil moisture during different growth stage [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(6): 14-21. (in Chinese)
- 19 冀春花,林升强,黄露茹,等. 叶面肥对无土栽培樱桃番茄性状的影响及产量与植株性状的数学模型研究[J]. 中国农学通报, 2014, 30(4): 175-178.
JI Chunhua, LIN Shengqiang, HUANG Luru, et al. Effects of soilless culture on cherry tomato characters after using foliar fertilizer and study on the mathematical model of plant characters and yield [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(4): 175-178. (in Chinese)
- 20 石小虎,曹新霞,杜太生,等. 温室膜下沟灌水氮耦合对番茄品质的影响和评价研究[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(3): 79-82, 105.
SHI Xiaohu, CAO Hongxia, DU Taisheng, et al. Impact of water and nitrogen coupling on quality of greenhouse tomato with furrow irrigation under film [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(3): 79-82, 105. (in Chinese)
- 21 PHENE C J, HUTMACHER R B, DAVIS K R, et al. Water and fertilizer management of processing tomatoes [J]. Acta Horticulture, 1990, 277: 137-193.
- 22 PLAYAN E, FACI J M B. Fertigation field experiments and a simple model [J]. Irrigation Science, 1997, 17: 163-171.
- 23 WEIVER U, VAN RIESEN U, SVPHARPF H C. Nil-N-plots: system to estimate the amount of the nitrogen topdressing of vegetables [J]. Acta Hort, 2001(563): 47-52.
- 24 雷喜红,李新旭,王铁臣,等. 不同种植密度对番茄长势、果实品质及产量的影响[J]. 北方园艺, 2015(7): 30-33.
LEI Xihong, LI Xinxu, WANG Tiechen, et al. Effect of planting development, fruit quality and yield of tomato [J]. Northern Horticulture, 2015(7): 30-33. (in Chinese)
- 25 陈贤,王其刚,关文灵,等. 番茄品系产量的逐步回归分析[J]. 北方园艺, 2007(3): 8-9.
CHEN Xian, WANG Qigang, GUAN Wenling, et al. The stepwise regression analysis of yields of tomato breeding lines [J]. Northern Horticulture, 2007(3): 8-9. (in Chinese)

(上接第 386 页)

- 15 冯建英. 葡萄设施栽培技术效果与效益评价研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2013.
FENG Jianying. Evaluation on the technical benefits of the protected grapecultivation [D]. Beijing: China Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- 16 骆世明. 农业生态学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001.
- 17 KOCTÜRK O M, ENGIN DENI Z S. Energy and cost analysis of sultana grape growing: a case study of Manisa, west Turkey [J]. African Journal of Agricultural Research, 2009, 4(10): 938-943.
- 18 BOLANDNAZAR E, KEYHANI A, OMID M. Determination of efficient and inefficient greenhouse cucumber producers using data envelopment analysis approach, a case study: Jiroft city in Iran [J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 79(18): 108-115.
- 19 ZHANG L, WANG J, WEN H, et al. Operating performance, industry agglomeration and its spatial characteristics of Chinese photovoltaic industry [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 65: 373-386.
- 20 FÄRE R, GROSSKOPF S, NORRIS M. Productivity growth, technical progress, and efficiency change in industrialized countries: reply [J]. American Economic Review, 1997, 87(5): 1033-1039.
- 21 曾威, 杨建东, 凌宇. 基于 Java 和 Matlab 混合编程的水泵水轮机全特性构造系统 [J]. 大电机技术, 2014(4): 55-58.
ZENG Wei, YANG Jiandong, LING Yu. The generation of pump-turbine characteristics based on hybrid programming between Java with Matlab [J]. Large Electric Machine & Hydraulic Turbine, 2014(4): 55-58. (in Chinese)
- 22 王薇, 杨丽萍. Java 和 Matlab 混合编程及其应用 [J]. 长春大学学报, 2012, 22(10): 1186-1189.
WANG Wei, YANG Liping. Mixed programming of Java and Matlab and its application [J]. Journal of Changchun University, 2012, 22(10): 1186-1189. (in Chinese)
- 23 李斌全, 穆维松, 郑小平. 基于 B/S 和 SFA 的葡萄生产技术效率评估系统 [J]. 计算机与现代化, 2013(10): 125-130.
LI Binqun, MU Weisong, ZHENG Xiaoping. Technical efficiency evaluating system for grape production based on B/S architecture and SFA [J]. Computer & Modernization, 2013(10): 125-130. (in Chinese)