

## 交替灌溉条件下水氮供给对番茄 生长及水分利用的影响

张彦<sup>1</sup>, 刘小刚<sup>1</sup>, 张富仓<sup>2</sup>, 李志军<sup>2</sup>, 戈振扬<sup>1</sup>, 杨启良<sup>1</sup>

(1. 昆明理工大学现代农业工程学院, 云南 昆明 650500;

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:** 为探讨控制性分根区交替灌溉条件下不同水氮供给对作物生长特性的影响, 采用番茄盆栽试验, 研究了交替灌溉和水氮处理对番茄生长、产量和水分利用的影响。结果表明: 交替灌溉方式下, 低氮处理的番茄株高较大; 高水低氮和低水中氮处理的茎粗较大; 中氮处理的干物质累积总量分别是高氮和低氮的 1.25 倍和 1.01 倍。交替灌溉高水处理的水分利用效率均值分别是交替灌溉低水处理和常规充分灌水处理的 1.05 倍和 1.12 倍。交替灌溉增加根冠比 7.89% ~ 31.61%。常规充分灌水处理的产量均值最大, 分别是交替高水和交替低水的 1.05 倍和 1.39 倍。在交替灌水条件下, 中氮处理的耗水量分别是低氮和高氮的 1.04 倍和 1.16 倍。

**关键词:** 交替灌溉; 水氮供给; 番茄; 生长特性; 产量; 水分利用

**中图分类号:** S275.3; S641.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2013)01-0071-05

### Effects of water and nitrogen supply on growth and water use of tomato under controlled root-divided alternative irrigation

ZHANG Yan<sup>1</sup>, LIU Xiao-gang<sup>1</sup>, ZHANG Fu-cang<sup>2</sup>, LI Zhi-jun<sup>2</sup>, GE Zhen-yang<sup>1</sup>, YANG Qi-liang<sup>1</sup>

(1. Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2. 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:** In order to find out the influence of different water and nitrogen supply to growth characteristics of crops under the controlled root-divided alternative irrigation (CRDI), a pot experiment was conducted to analyze the growth, yield and water use efficiency of tomato under the treatments of CRDI as well as water and nitrogen supply. The results indicated that, under CRDI, the plant height of low nitrogen treatment was high, the stem diameter of high water and low nitrogen treatment or low water and middle nitrogen treatment was high, and the dry mass accumulation of medium nitrogen treatment was 1.25 and 1.01 times that of high nitrogen treatment and low nitrogen treatment, respectively. The mean water use efficiency of high water treatment with CRDI was 1.05 and 1.12 times that of low water treatment with CRDI and high water treatment with conventional irrigation respectively. CRDI could increase root-shoot ratio by 7.89% ~ 31.61%. The mean yield of high water treatment with conventional irrigation was the highest, which was 1.05 and 1.39 times that of high water treatment with CRDI and low water treatment with CRDI respectively. Under CRDI, the water consumption of medium nitrogen treatment was 1.04 and 1.16 times that of low nitrogen treatment and high nitrogen treatment respectively.

**Keywords:** controlled root-divided alternative irrigation (CRDI); water and nitrogen supply; tomato; growth characters; yield; water use

控制性分根交替灌水技术(CRDI)是一种节水灌溉新技术。该技术通过改变和调节作物根系区域的湿润方式,使其产生的水分胁迫信号传递至叶片气孔,减小蒸腾耗水。同时可以改善根系的吸收功

收稿日期:2012-06-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50879073,51109102,51009073);水利部公益项目(201101042);十二五 863 项目(2011AA100504);云南省应用基础研究资助项目(2010ZC043)和云南省教育厅重点项目(2011Z035)

作者简介:张彦(1985—),女,河南安阳人,硕士生,主要从事节水灌溉理论与新技术研究。E-mail:zy\_0004@163.com。

通信作者:刘小刚(1977—),男,甘肃镇原人,副教授,主要从事节水灌溉理论与新技术研究。E-mail:liuxiaogang66@qq.com。

能,达到不减少光合产物而大幅度提高水肥利用效率的目的。大量的研究表明,控制性分根交替灌水技术可以减少作物的生长冗余,可使灌溉水利用效率和植物水利用效率明显提高<sup>[1-10]</sup>。水氮是影响农业生产及作物生长最主要的两大因素,科学合理地调节灌水量与施氮量可使有限水氮产生良好的交互作用,达到以肥调水、以水促肥的目的,对于提高作物生产能力和节水节肥至关重要<sup>[11-15]</sup>。本试验通过研究交替灌溉条件下不同水氮供给对番茄生长特性及水分利用的耦合,以便探明在这种新的灌水技术条件下番茄最佳的水氮耦合形式,为其水氮最优调控提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验于 2011 年 7--12 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遮雨棚下进行。供试番茄品种为世纪粉冠王,供试土壤为瘠土,田间持水量为 24%。采用塑料桶(桶口直径 32.5 cm,底部直径 26.5 cm,高 33 cm)进行盆栽试验,桶底部均匀钻有 9 孔以增加其透气性,交替灌溉处理的桶中央用塑料膜均匀隔开,防止水分侧渗,塑料布中央做“V”形缺口,用于定植番茄植株。桶底铺有纱网和细沙,两边装入事先施入  $0.513 \text{ g KH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{kg}^{-1}$  干土并搅拌均匀的等质量土壤,每桶装土 23 kg。装土时分别在两侧中央各插 1 根直径 2.5 cm 的 PVC 管用于灌水,管上交错打 4 行小孔用于渗水,每行 6 个,孔间距 2.5 cm,管四周和底部用纱网包裹,以防土壤堵塞渗水孔。2011 年 7 月 27 日定植,每桶 1 株,缓苗 10 d,共灌水 6.5 L。

### 1.2 试验设计

灌水方式为交替灌溉(AI),对根系两侧进行交替灌水,交替周期为 5 d。以常规充分灌水(CI)作为对照,灌水控制土壤水分上下限为  $70\% \theta_F \sim 85\% \theta_F$ ,以 WO 表示。交替灌溉设 2 个灌水水平,高水(WH)为常规充分灌水的 80%,低水(WL)为常规充分灌水的 60%,灌水量以称重法控制。设 3 个施氮水平,高氮(NH) $0.45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、中氮(NM) $0.30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和低氮(NL) $0.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 纯 N(尿素分析纯)。氮肥分 3 次等量随水施入,施入时间分别为 8 月 12 日、9 月 20 日、10 月 6 日。共 9 个处理,每处理重复 4 次。

### 1.3 测定项目及方法

灌水处理后每 5d 测定株高和茎粗 1 次,株高采用卷尺测量从土面到生长点之间的高度;茎粗采用游标卡尺测定茎基部上方 1 cm 处直径。番茄生长

后期,在第 3 穗果后整枝打杈。果实成熟期分别测定前 2 层单果重量,处理结束时采集冠层部分,用清水将根系冲洗干净,并用吸水纸将根表面的水分吸干,保持  $105^\circ\text{C}$  杀青 30 min 后调温至  $80^\circ\text{C}$  在烘箱中烘至恒重,分别测定冠层和根系干重。试验数据利用 SAS 统计分析软件进行分析和显著性检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 控制性分根区交替灌溉下不同水氮供给对番茄生长性状的影响

株高、茎粗是作物生长发育的两个最重要的指标。试验结果表明(图 1),交替灌溉条件下不同水氮供给对番茄的株高影响不同。常规充分灌水处理的株高均值最大,交替低水处理的最小。在番茄生长后期,交替高水低氮处理的株高最大,这和常规充分灌水的规律一致。而在低水条件下,生长前期中氮处理的株高较大,后期是高氮处理的株高最大。说明在水分亏缺的条件下,适量增施氮肥会提高植物的抗逆能力,提高了生长率。在交替灌溉条件下,高水低氮处理的生长后期番茄株高最大,比高氮处理的高约 5.73 cm。交替灌溉条件下低水和高水处理的后期株高均值相差仅为 0.34 cm,说明交替灌溉低水处理并不明显影响植物生长。与常规充分灌水相比,在施氮相同的条件下,交替灌溉对株高有不同程度的抑制,其中中氮处理的降低 3.97%,高氮处理的降低最小,为 0.36%。

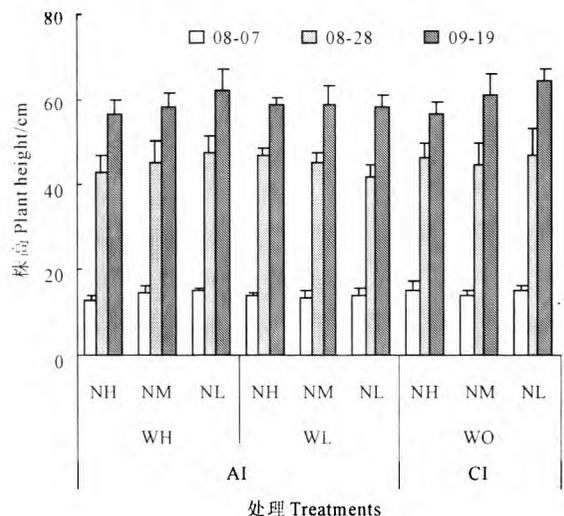


图 1 交替灌溉条件下水氮处理对番茄株高的影响

Fig. 1 Effects of water and nitrogen supply on plant height of tomato under alternative irrigation

图 2 表明,不同灌水方式下水氮供给对番茄的茎粗影响不同。生长前期(8 月 15 日)低氮处理的茎粗最大,这是由于番茄在营养生长阶段需水需肥

较小,过多的水肥供给反而抑制了其生长。在交替高水灌溉条件下,低氮处理的茎粗较大,这和常规充分灌水的规律一致。而在交替低水灌溉条件下,中氮处理的茎粗大于高氮和低氮处理(8月15日除外),说明交替灌溉低水中氮处理的水氮表现出良好的协同效应,达到了以水调肥和以肥促水的目的。在番茄生长后期,交替灌溉对茎粗略有抑制。与常规充分灌水相比,交替高水的茎粗均值降低2.63%,交替低水的降低4.69%。在交替灌溉下,高水低氮处理和低水中氮处理的番茄茎粗较大。交替灌溉高水处理的番茄在生长后期,茎粗从大到小依次为低氮、高氮和中氮,而低水处理的茎粗从大到小依次为中氮、低氮和高氮。

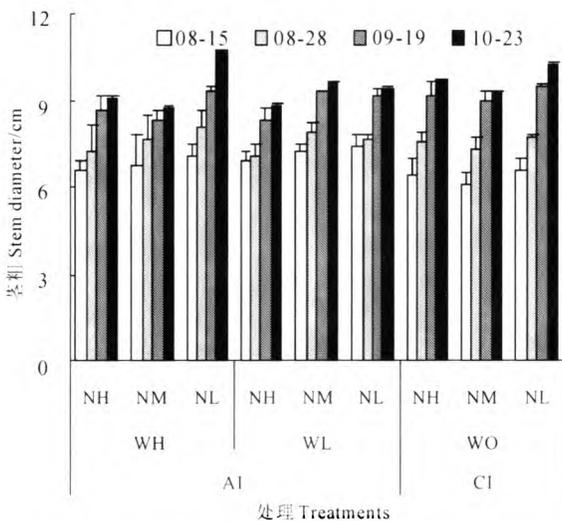


图 2 交替灌溉条件下水氮处理对番茄茎粗的影响

Fig.2 Effects of water and nitrogen supply on stem diameter of tomato under alternative irrigation

### 2.2 控制性分根区交替灌溉下不同水氮供给对番茄干物质累积的影响

根系对水肥的吸收是作物生命活动的基础,良好的根系生长发育是水肥吸收和获得高产的关键。试验结果表明(图3),根系仅占干物质总量的2.8%~3.8%,其变化范围为1.34~2.17 g·株<sup>-1</sup>。其中交替高水处理的根系均值最大,为1.93 g·株<sup>-1</sup>,分别比交替低水和常规充分灌水处理的高0.40 g·株<sup>-1</sup>和0.25 g·株<sup>-1</sup>。交替灌溉促进了根系生长,增加根冠比7.89%~31.61%。

不同水氮供给对冠层干物质累积影响不同,其中常规充分灌水处理的冠层干物质均值最大,分别比交替高水和交替低水处理的高约3.48 g·株<sup>-1</sup>和10.62 g·株<sup>-1</sup>。说明在交替灌溉条件下低水处理对植物的生长产生了较大的抑制作用,交替高水和常规充分灌水对冠层干物质的影响则相差不大。灌水

条件相同时,施氮量对干物质累积影响明显。在交替灌溉条件下,中氮处理的干物质累积总量分别是高氮和低氮处理的1.25倍和1.01倍。试验结果还表明,交替灌溉方式下,中氮处理的冠层干物质累积量较大,而常规充分灌水下则是高氮处理的较大,说明灌水方式和施氮量对干物质累积有明显的交互作用。计算可知,交替高水处理的根冠比分别为交替低水和常规充分灌水处理的1.08倍和1.21倍,说明交替灌溉有利于根系充分利用土壤中的水分和养分。交替灌溉条件下不同水氮处理对干物质累积总量的影响规律与对冠层干物质的影响一致。

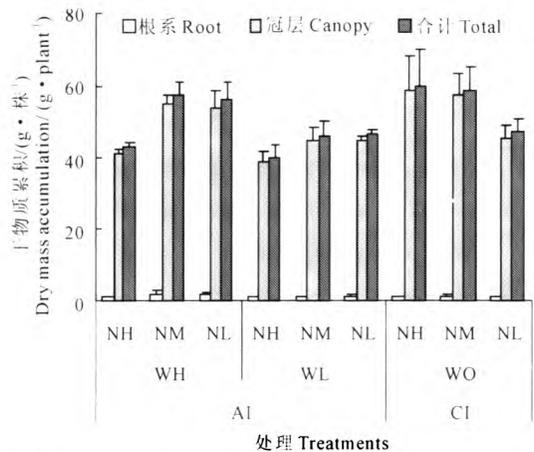


图 3 交替灌溉条件下水氮处理对番茄干物质累积的影响

Fig.3 Effects of water and nitrogen supply on dry mass accumulation of tomato under alternative irrigation

### 2.3 控制性分根区交替灌溉下不同水氮供给对番茄产量的影响

由图4可知,交替灌溉条件下不同水氮供给对番茄不同时期的产量影响不同,本研究只对前2层产量进行了统计分析。结果表明,常规充分灌水处理的第一层产量均值最高,分别比交替高水和交替低水高9.40 g·株<sup>-1</sup>和73.86 g·株<sup>-1</sup>。交替灌溉方式下,高水低氮处理的产量最高,是低水高氮产量的1.68倍。与第1层产量相比,第2层明显降低,降幅达36%~49%。不同灌水方式和灌水水平对番茄第2层产量的影响规律和第1层相似,即常规充分灌水>交替高水>交替低水。在交替灌溉条件下,氮肥对不同时期的产量影响不同,第2层产量均是中氮处理的最高;第1层产量分别是高水低氮和低水中氮的较高。计算2层总产量可知,中氮处理的产量最高。可见高氮抑制了番茄产量的增加,低氮不足以提供番茄生长必须的养分,中氮有利于番茄产量的提高。常规充分灌水的产量均值最大,分别是交替高水和交替低水的1.05倍和1.39倍。说明

在充分供水的条件下,交替高水处理能保证番茄的产量不受影响,而交替低水处理抑制了番茄的营养生长和生殖生长。

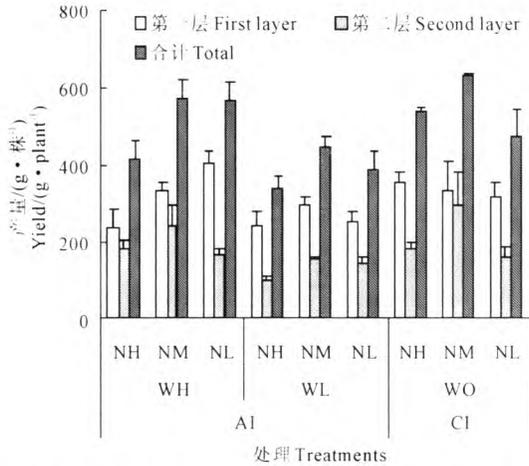


图 4 交替灌溉条件下水氮处理对番茄产量的影响

Fig.4 Effects of water and nitrogen supply on tomato yield under alternative irrigation

#### 2.4 控制性分根区交替灌溉下不同水氮供给对番茄水分利用效率的影响

交替灌水方式下不同水氮供给对番茄水分利用效率有明显的交互作用(图 5)。与常规充分灌水相比,交替高水灌溉和交替低水灌溉分别节水 15.98% 和 33.14%。在交替灌水条件下,施氮对番茄的耗水量有较大影响,中氮处理的耗水量分别是低氮和高氮的 1.04 倍和 1.16 倍。这可能是高氮和低氮不能为番茄生长提供良好的营养环境,而中氮处理能促进番茄生长,从而增加了耗水量。试验结果还表明,不同灌水和氮肥处理对水分利用效率影响明显。交替高水的水分利用效率均值分别是交替低水和常规充分灌水的 1.05 倍和 1.12 倍,说明交替高水处理不但节约灌水而且提高水分利用效率,而交替低水既影响了干物质累积又降低了水分利用效率。

### 3 讨论

灌水方式、施氮量和灌水水平都会影响作物对水肥的吸收和利用,研究表明交替灌溉条件下不同水氮供给对番茄的株高、茎粗、干物质累积和产量的影响不同。试验结果表明,交替灌溉的根冠比较大,主要由于部分根区灌溉使作物承受一定程度的水分胁迫,刺激了根系吸收补偿功能,提高了根系的传导能力,这有利于水氮吸收和水分利用效率的提高<sup>[16]</sup>。前人研究结果表明,水分利用效率一般随着灌水量的增加而降低,而本试验发现交替高水处理的水分利用效率均值是交替低水的 1.05 倍,这主要

是由于交替低水灌溉对植株生长起到了严重抑制作用,导致产量和水分利用效率均有下降。与常规充分灌水相比,交替高水灌溉与交替低水灌溉分别节约灌水 3.85 L·株<sup>-1</sup>和 7.98 L·株<sup>-1</sup>,节水达 16% 和 33%,但交替低水灌溉并没有明显提高水分利用效率。施氮对番茄的水分利用效率也有较大的影响,本试验发现,中氮处理的水分利用效率分别是高氮和低氮处理的 1.10 倍和 1.09 倍,这是由于适量的施氮可以增强番茄对养分和水分的吸收,促进生长和发育,有效提高水分利用效率<sup>[17]</sup>;而在土壤水分严重亏缺的情况下,增施氮肥反而抑制了作物的正常生长。试验结果表明,交替灌溉条件下,高水处理可以获得较高的产量,而低水处理明显抑制了产量的增加。说明交替高水处理能提供比较适宜的土壤水分环境,有利于水分利用效率和产量的提高。

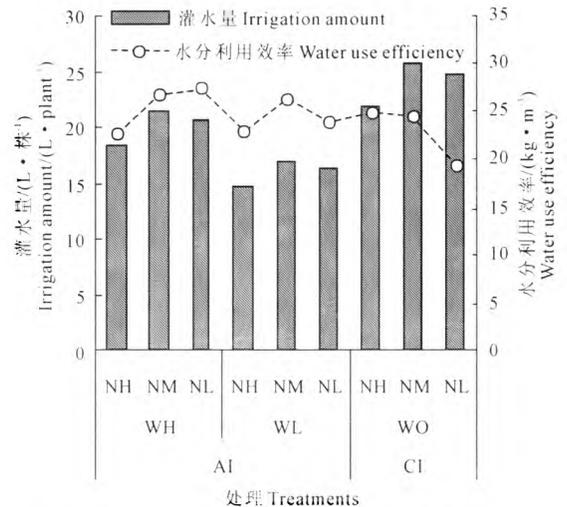


图 5 交替灌溉条件下水氮处理对番茄水分利用效率的影响

Fig.5 Effects of water and nitrogen supply on water use efficiency of tomato under alternative irrigation

### 4 结论

1) 交替灌溉方式下,中氮处理对番茄株高的抑制较大,低氮处理抑制较小;高水低氮和低水中氮处理的茎粗较大。

2) 交替灌溉方式下,中氮处理的干物质累积总量较大。与常规充分灌水相比,交替高水和交替低水分别抑制产量 4.76% 和 28.06%。

3) 交替灌水方式下,中氮处理的耗水量最大,低氮的次之,高氮的最小。交替高水处理的水分利用效率均值分别是交替低水和常规充分灌水的 1.05 倍和 1.12 倍。盆栽模拟条件下,交替灌溉高水中氮处理的番茄可以获得较高的产量和水分利用效率。

## 参考文献:

- [1] Wakrim R, Wahbi S, Tahi H, et al. Comparative effects of partial root drying (PRD) and regulated deficit irrigation (RDI) on water relations and water use efficiency in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). [J]. *Agriculture Ecosystems Environment*, 2005, 106: 275-287.
- [2] Buttar G S, Thind H S, Aujla M S. Methods of planting and irrigation at various levels of nitrogen affect the seed yield and water use efficiency in transplanted oilseed rape (*Brassica napus* L.). [J]. *Agriculture Water Manage*, 2006, 85: 253-260.
- [3] 康绍忠, 潘英华, 石培泽, 等. 控制性作物根系分区交替灌溉的理论及试验[J]. *水利学报*, 2001, (11): 80-86.
- [4] 史文娟, 康绍忠. 控制性作物根系分区供水的节水机理及研究进展[J]. *水科学进展*, 2001, 12(2): 270-275.
- [5] 梁宗锁, 康绍忠, 石培泽, 等. 隔沟交替灌溉对玉米根系分布和产量的影响及其节水效益[J]. *中国农业科学*, 2000, 33(6): 26-32.
- [6] 潘英华, 康绍忠. 交替隔沟灌溉水分入渗规律及其对作物水分利用的影响[J]. *农业工程学报*, 2000, 16(1): 39-43.
- [7] 杜太生, 康绍忠, 胡笑涛, 等. 根系分区交替灌溉对棉花产量和水分利用效率的影响[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(10): 2061-2068.
- [8] 康绍忠, 蔡焕杰. 作物根系分区交替灌溉和调亏灌溉的理论与实践[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 14-38.
- [9] 梁宗锁, 康绍忠, 张建华, 等. 控制性分根交替灌溉对作物水分利用率的影响及节水效应[J]. *中国农业科学*, 1998, 31(5): 88-90.
- [10] Kang S Z, Liang Z S, Hu W, et al. Water use efficiency of controlled alternate irrigation on roots divided maize plants[J]. *Agric Water Manage*, 2001, 38: 69-76.
- [11] Singh P N, Joshi B P, Singh G. Water use and yield response of wheat to irrigation and nitrogen on an alluvial soil in North India[J]. *Agriculture Water Manage*, 1987, 12: 311-321.
- [12] Kerentajer L, Berliner P R. Effects of moisture stress on nitrogen fertilizer response in dryland wheat[J]. *Agronomy Journal*, 1988, 80: 977-981.
- [13] Sharma B D, Jalota S K, Kar S, et al. Effect of nitrogen and water uptake on yield of wheat[J]. *Fertilizer Research*, 1992, 31: 5-8.
- [14] 唐玉霞, 孟春香, 贾树龙, 等. 冬玉米对水肥的反应差异与节水冬施肥技术[J]. *干旱地区农业研究*, 1996, 14(2): 36-40.
- [15] 翟丙年, 李生秀. 冬玉米水氮配合关键期和亏缺敏感期的确定[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(6): 1188-1195.
- [16] Lehrsch G A, Sojka R E, Westermann D T. Nitrogen placement, row spacing, and furrow irrigation water positioning effects on corn yield[J]. *Agron J*, 2000, 92(6): 1266-1275.
- [17] 郭修武, 王丛丛, 周兴本, 等. 水分胁迫下肥料配比对葡萄生长发育的影响[J]. *华北农学报*, 2012, 27(2): 140-145.

(上接第51页)

## 参考文献:

- [1] 刘晓芳, 蒋腾, 李萍, 等. 新疆发展特色林果的优势与途径[J]. *经济林研究*, 2006, 24(3): 88-91.
- [2] 刘郁娜, 徐文修, 张巨松, 等. 杏棉间作系统棉花冠层小气候特征及棉花产量边际效应研究[J]. *新疆农业科学*, 2011, 48(12): 2176-2182.
- [3] 周志翔, 胡婉仪. 泡桐林带遮光与桐果间作模式的研究[J]. *华中农业大学学报*, 1994, 13(4): 409-417.
- [4] 袁玉欣, 贾渝彬, 邵吉祥. 杨粮间作系统小气候水平分布特征研究[J]. *中国生态农业学报*, 2002, 10(3): 21-23.
- [5] 刘志龙, 方建民, 虞木奎, 等. 3种林茶复合系统小气候特征日变化研究[J]. *林业科技开发*, 2009, 2(2): 55-59.
- [6] 李志欣, 刘进余, 刘春田. 枣粮间作复合种植对作物生态及产量的动态影响[J]. *河北农业大学学报*, 2002, 25(4): 45-48.
- [7] 张艳敏, 李晋生, 钱维朴, 等. 小麦冠层结构与光分布研究[J]. *华北农学报*, 1996, 11(1): 54-58.
- [8] 赵中华, 刘德章, 郭美丽, 等. 棉花群体冠层结构与干物质生产及产量的关系[J]. *棉花学报*, 1997, 9(2): 90-94.
- [9] 金宝石, 查良松. GIS支持下的粮食单产与光热水分布特征相关分析——以安徽省为例[J]. *中国农业气象*, 2006, 27(1): 1-5.
- [10] 杨兴洪, 邹琦, 赵世杰. 遮荫和全光下生长的棉花光合作用和叶绿素荧光特征[J]. *植物生态学报*, 2005, 29(1): 8-15.
- [11] 周治国. 苗期遮荫对棉花功能叶光合特性和光合产物代谢的影响[J]. *作物学报*, 2011, 27(6): 967-973.
- [12] 魏红国, 王飞, 张巨松, 等. 杏棉间作对棉花产量及其构成因素的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2011, 29(4): 214-218.
- [13] 龚鹏, 杨波, 车玉红, 等. 扁桃棉花间作对棉花光合特性及产量影响的初步研究[J]. *新疆农业科学*, 2009, 46(5): 975-979.
- [14] 韩会玲, 康凤君. 水分胁迫对棉花生产影响的试验研究[J]. *农业工程学报*, 2001, 17(3): 37-40.
- [15] Medonald A S, Davies W J. Keeping in touch: response of the whole plant to deficits in water and nitrogen supply[J]. *Adv Bot Res*, 1996, 22: 229-300.
- [16] 支金虎, 伍维模, 危常洲, 等. 水分与氮素对膜下滴灌棉花叶片叶绿素含量时空分布的影响[J]. *西北农业学报*, 2007, 16(1): 7-12.
- [17] 宫璇, 张如莲, 曹红星, 等. 4个椰子品种光合、蒸腾作用日变化特征及影响因素[J]. *热带作物学报*, 2011, 32(2): 221-224.
- [18] 徐俊增, 彭世彰, 魏征, 等. 节水灌溉水稻叶片胞间CO<sub>2</sub>浓度及气孔与非气孔限制[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(7): 76-80.
- [19] 罗新宁, 陈冰, 张巨松, 等. 棉花氮素和SPAD值叶位分布规律研究[J]. *棉花学报*, 2009, 21(5): 427-430.