

水分与氮素对南疆膜下滴灌棉花水分 利用效率与蒸腾速率的影响

伍维模¹, 董合林², 王 萍³, 陈康谓³, 危常洲⁴

(1. 塔里木大学植物科技学院, 新疆阿拉尔 843300; 2 中国农科院棉花研究所, 河南安阳 455004;
3. 新疆生产建设兵团农一师十二团, 新疆阿拉尔 843300; 4. 石河子大学农学院, 新疆石河子 832003)

摘 要: 研究了不同滴水量 (2 850、3 900、4 950 m³/hm²)与施氮量 (0 180 270 360 N kg/hm²)条件下南疆膜下滴灌棉花蕾期、花铃期与盛铃期功能叶水分利用效率 WUE与蒸腾速率 E。结果表明,在蕾期、花铃期水分与氮素对棉花叶片水分利用效率 WUE无显著影响;在盛铃期, WUE显著地受到水分的影响,施氮、施氮与水分的交互作用对 WUE无显著影响。在盛铃期时,滴水量为 4 950 m³/hm²时 WUE显著高于滴水量为 3 900 2 850 m³/hm²时的 WUE,后两者之间的 WUE无显著差异。不同处理棉花叶片蒸腾速率 E在蕾期均高于花铃期和盛铃期。在蕾期,水分与氮素对蒸腾速率无显著影响;在花铃期,水分对蒸腾速率 E的影响达到了显著水平,最高滴水量处理的蒸腾速率也最高,而施氮、水分与施氮的交互作用对蒸腾速率 E无显著影响。在盛铃期,最高滴水量 4 950 m³/hm²条件下,蒸腾速率 E显著地受到施氮的影响,施氮量最高时,其蒸腾速率也最高。南疆膜下滴灌棉花水分利用效率、蒸腾速率的大小与棉田冠层环境因子密切相关,其中,温度是最主要的影响因子。WUE与叶片温度、空气温度、空气饱和差、胞间 CO₂与空气 CO₂浓度比呈现出极显著的负相关关系, WUE与光合有效辐射 PAR呈显著负相关关系, WUE与空气相对湿度、空气 CO₂浓度呈现出极显著的正相关关系。蒸腾速率与空气温度、叶片温度、光合有效辐射 PAR呈现出极显著的正相关关系。蒸腾速率与空气 CO₂浓度、胞间 CO₂与空气 CO₂浓度比呈现出极显著的负相关关系。

关键词: 水分; 氮素; 膜下滴灌棉花; 水分利用效率; 蒸腾速率

中图分类号: S562 文献标识码: A 文章编号: 1004-1389(2006)01-0011-05

The Effects of Water and Nitrogen on Water Use Efficiency and Transpiration Rate in Mulched-cotton by Drip Irrigation in South-Xinjiang

WU Wei-mo¹, DONG He-lin², WANG Ping³, CHEN Kang-wei³ and WEI Chang-zhou⁴

(1. Institute of Plant Science and Technology, Tarim University, Alar Xinjiang 843300; China; 2. Cotton Research Institute of CAAS, Anyang Henan 455004, China; 3. 12 Regiment, Xinjiang Construction Corps, Alar Xinjiang 843300 China; 4. Institute of Agriculture of Shihezi University, Shihezi 832003, China)

Abstract This experiment studied the effects of water and nitrogen on water use efficiency and transpiration rate in mulched-cotton by drip irrigation in South-Xinjiang China. The water application rate was 2 850、3 900、4 950 m³/hm², and the nitrogen application rate was 0 180 270 360 Nkg/hm². Using the li-6400 portable photosynthesis system (U. S Li-COR), cotton leaf water use efficiency (WUE) and transpiration rate (E) were gained from budding to bolling stage. The results showed that in budding and early bolling stage, water and nitrogen application had no significant effects on the WUE. But at later bolling stage, WUE was significantly effected by water

* 收稿日期: 2005-08-15 修回日期: 2005-09-20
基金项目: 农业部 948重大国际合作资助项目 (2003-253); 农业部农业产业结构调整重大研究专项 (04-07-03B)资助。
作者简介: 伍维模 (1971-),男,讲师,硕士,从事植物营养与节水灌溉的教学科研工作。 Tel: (0997)4680312; E-mail: wwxjilm@taru.edu.cn

application and not by nitrogen and nitrogen water interaction. When irrigation $4\ 950\ \text{m}^3/\text{hm}^2$, the WUE was the highest and it was higher than that of irrigation $2\ 850\ 3\ 900\ \text{m}^3/\text{hm}^2$. In all treatments the transpiration rate in budding stage were higher than that of at bolling stage. In budding water and nitrogen had no significant effects on transpiration rate, in later bolling water had significant effect on transpiration rate, the more irrigation, the more the transpiration rate. But the nitrogen and nitrogen water interaction had no significant effects on transpiration rate. Under irrigation $4\ 950\ \text{m}^3/\text{hm}^2$, transpiration rate was notable effected by nitrogen application, and the more nitrogen, the more transpiration rate. In South-Xingjiang, mulched-cotton by drip irrigation the leaf WUE and transpiration rate were related by environmental factors and temperature was the key one. The relationship between WUE and environmental factors such as leaf temperature, air temperature, VPD, ratio of intercellular CO_2 concentration to ambient CO_2 concentration (G_i/C_a) were significant ($P < 0.01$) negative. WUE had significant ($P < 0.05$) negative relationship of PAR. WUE had significant ($P < 0.01$) positive relationship. The relationship between transpiration rate and environmental factors such as air temperature, leaf temperature, PAR were significant ($P < 0.01$) positive. The relationship between transpiration rate and air CO_2 concentration, ratio of intercellular CO_2 concentration to ambient CO_2 concentration (G_i/C_a) were significant ($P < 0.01$) negative.

Key words Water; Nitrogen; Mulched-cotton by drip irrigation; WUE; Transpiration rate

水分是干旱半干旱地区农田生态系统良性运转和农作物产量提高的主要限制因素。作物水分利用效率可以从叶片、群体和产量三个层次来考虑^[1]。叶片水平的水分利用效率 WUE 是指叶片的净光合速率与同时期的蒸腾速率之比。作物蒸腾是形成作物产量和经济产量的基础。调节植物的气孔阻力,减少无效蒸腾,是提高作物蒸腾水量有效性的的重要途径。影响作物水分利用效率的因素很多,由于作物品种和基因型的差异,水分利用效率也存在差异,另外土壤水分、大气湿度、空气温度、空气 CO_2 浓度、氮素营养等环境因子对水分利用效率也有显著影响^[2]。这方面的研究在小麦上比较多。如吴海卿等发现,合理施肥可提高光合、蒸腾速率和蒸腾蒸散比 (E/ET),降低土壤水分无效蒸发损失,增加有效穗数和经济产量,提高冬小麦的水分利用效率。氮肥、磷肥和氮、磷互作效应对水分利用效率的影响明显,在施氮量较少条件下,增施磷肥对提高水分利用效率的作用较小,只有当氮肥施用达到一定量时,增施磷肥对提高水分利用效率的作用才显著体现出来。氮、磷配合同步增施既能达到高产,又能显著提高水分利用效率^[3]。在水分胁迫下,施氮后小麦叶片光合速率增加,蒸腾速率下降,水分利用效率 WUE 提高,甚至与正常供水的相当。说明因水分胁迫导致的作物 WUE 的减少通过增施氮肥会得到部分补偿^[4]。但是在严重的干旱条件下,高氮处理反而降

低小麦的 WUE^[5]。施肥能提高作物 WUE 的机理在于三个方面:一是施肥促进了根系的发育,提高了根系的吸水功能,以及改善了叶片的光合能力,增加同化物含量^[6];二是施肥可增加土壤与植物间的水分热力学函数—偏摩尔自由能梯度,提高植株的提水作用,平抑不同土壤含水量所导致的土壤—植株间水分自由能梯度的差异^[7];三是施肥可使植株发育好,郁闭度高,田间散失的水分量减少,提高蒸腾、蒸发以及耗水的生物转化率^[8]。

关于棉花,尤其是膜下滴灌棉花的水分利用效率 WUE 与蒸腾速率 E 受水分与氮素供应影响的研究还比较少^[13]。而南疆棉区是我国重要的商品棉生产基地,该区属于灌溉农业,水分在棉花生产上起着重要的作用。本研究针对南疆棉区,探讨膜下滴灌棉花叶片水分利用效率 WUE 与蒸腾速率 E 等生理指标是否受滴水量与施氮量的影响,为进一步推动膜下滴灌技术在南疆的大面积应用以及棉花高产高效节水途径提供理论依据。

1 材料与方法

2004 年在新疆生产建设兵团农一师十二团九连进行膜下滴灌棉花水肥田间试验。供试棉花品种为中棉所 35 号。膜下滴灌棉花一膜八行,膜宽 $2.54\ \text{m}$,平均行距 $31.8\ \text{cm}$,平均株距 $11.5\ \text{cm}$ 。每条膜铺设二根滴灌带。小区宽 $2.54\ \text{m}$,长 $10\ \text{m}$ 。试验考察两个因素,水分及施氮量。水分设

3个不同滴水量:即棉花生育期总滴水量 (m^3/hm^2)分别为 2 850(A1)、3 900(A2)、4 950(A3);总施氮量 ($\text{N kg}/\text{hm}^2$)设 4个水平,分别为 0

(B1)、180(B2)、270(B3)、360(B4)。试验共 12个处理,各处理的滴水量与施氮量见表 1

表 1 试验设计

Table 1 The experiment design												
处理 Treatments	1 A1 B1	2 A1 B2	3 A1 B3	4 A1 B4	5 A2 B1	6 A2 B2	7 A2 B3	8 A2 B4	9 A3 B1	10 A3 B2	11 A3 B3	12 A3 B4
A滴水量 Amount of drip irrigation/(m^3/hm^2)	2850	2850	2850	2850	3900	3900	3900	3900	4950	4950	4950	4950
B施氮量 Amount of Nitrogen/(kg/hm^2)	0	180	270	360	0	180	270	360	0	180	270	360

采用完全随机区组设计,3次重复,共 36个小区。4月 8日播种,播前施 $398\text{ kg}/\text{hm}^2\text{ P}_2\text{O}_5$ 的三料磷肥、 $89\text{ kg}/\text{hm}^2\text{ K}_2\text{O}$ 的硫酸钾与氮肥(尿素)总量的 6%作基肥。余下 32%的氮肥(尿素)随水滴施。每个小区单独滴水滴肥,用水表控制滴水量,第 1次滴水时间为 6月 22日,共滴水 7次。化调 4次,各小区 DPC用量均保持一致。

在棉花蕾期(6月 6日)、花铃期(7月 19日)和盛铃期(8月 21日)12 00至 14 00用 LI-6400 光合测定仪(LI-6400 portable photosynthesis system,美国 LI-COR公司产)测定棉花功能叶片(由于棉花在 7月 9日打顶,因此蕾期、花铃期与盛铃期分别测倒四叶、倒二叶和倒一叶)净光合速率(P_n)、蒸腾速率(E)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度、空气饱和差(V_{pd})、空气温度(T_{air})、空气湿度(RH)等光合生理生态指标。每个小区测定 3个叶片,取其平均值作为小区结果。棉花叶片水分利用效率采用 $WUE = P_n/E^{[1]}$ 来计算。用 SAS6.02统计软件中的 ANOVA方法对数据进行方差分析与 DUNCAN多重比较,方差分析采用两因素完全随机区组固定效应模型。

2 结果与分析

2.1 不同生育时期棉花叶片的水分利用效率

由表 2可知,不同生育时期测定的 WUE以花铃期(7月 19日)最高,在 $1.024\sim 1.600\mu\text{molCO}_2\cdot\text{mmolH}_2\text{O}^{-1}$,蕾期(6月 6日)为 $0.962\sim 1.056\mu\text{molCO}_2\cdot\text{mmolH}_2\text{O}^{-1}$,盛铃期(8月 21日)的 WUE最低,为 $0.393\sim 0.679\mu\text{molCO}_2\cdot\text{mmolH}_2\text{O}^{-1}$ 。经过对水分利用效率数据 WUE的方差分析(表 3)发现,滴水量对蕾期(6月 6日)与花铃期(7月 19日)的 WUE无显著影响,但是对盛铃期(8月 21日)的 WUE有显著影响。施氮、施氮及水分的交互作用对棉花 3个生育时期的 WUE无显著影响。在盛铃期时,水分对膜下滴灌

棉花叶片 WUE的影响作用大于氮素,而且随滴水量的增加 WUE也增加,最高滴水量($4\ 950\text{ m}^3/\text{hm}^2$)水平下的 WUE也最高,达到了 $0.577\mu\text{molCO}_2\cdot\text{mmolH}_2\text{O}^{-1}$,极显著($P<0.01$)地高于滴水量中等滴水量($3\ 900\text{ m}^3/\text{hm}^2$)与低滴水量 $2\ 850\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 下的 WUE,而后两者之间的 WUE无显著差异。

表 2 棉花不同生育时期不同处理间的水分利用效率

Table 2 The WUE of different treatments in various growth period of cotton				
WUE($\mu\text{molCO}_2\cdot\text{mmolH}_2\text{O}^{-1}$)				
处理 Treatment	6月 6日	7月 19日	8月 21日	
1	0.944	1.813	0.572	
2	0.982	1.369	0.538	
3	0.923	1.326	0.393	
4	1.000	1.307	0.518	
5	0.984	1.024	0.439	
6	0.981	1.444	0.461	
7	0.963	1.512	0.506	
8	1.032	1.705	0.508	
9	1.039	1.558	0.477	
10	1.043	1.767	0.583	
11	1.062	1.75	0.569	
12	1.084	1.326	0.679	

表 3 滴水量与施氮量对棉花不同生育时期的水分利用效率的影响

Table 3 The WUE affected by drip irrigation and nitrogen in various growth period of cotton				
WUE($\mu\text{molCO}_2\cdot\text{mmolH}_2\text{O}^{-1}$)				
	水平 Level	6月 6日	7月 19日	8月 21日
滴水量 /(m^3/hm^2)	4950	1.056	1.600	0.577 a
	3900	0.990	1.421	0.478 b
	2850	0.962	1.453	0.505 b
施氮量 /($\text{kg}/\text{hm}^2\text{N}$)	360	1.038	1.445	0.568
	270	0.982	1.529	0.489
	180	1.002	1.526	0.527
	0	0.989	1.465	0.496

注:滴水量对 WUE的影响数据是 12个小区的平均值,施氮量对 WUE的影响数据是 9个小区的平均值。同一列数据后标记字母不同者表示在 5%水平具有显著差异性。

Note: Values of WUE affected by drip irrigation were the average of 12 plots and values affected by nitrogen application rate were the average of 9 plots. The different letter in the same list indicated significant difference at $P_{0.05}$ level.

2.2 不同生育时期棉花叶片的蒸腾速率

从表 4 看出,叶片蒸腾速率 E 在蕾期高于花铃期和盛铃期。蕾期(6月 6日)测定的蒸腾速率 E 平均为 12.403 mmolH₂O° m⁻²· s⁻¹,变化范围在 11.237~ 12.775 mmolH₂O° m⁻²· s⁻¹;花铃期(7月 19日)测定的 E 最小,平均为 7.985 mmolH₂O° m⁻²· s⁻¹,变化范围在 6.103~ 10.527 mmolH₂O° m⁻²· s⁻¹;盛铃期(8月 21日)测定的 E 居中,平均为 8.413 mmolH₂O° m⁻²· s⁻¹,变化范围在 7.143~ 9.147 mmolH₂O° m⁻²· s⁻¹。

表 4 棉花不同生育时期不同处理间的蒸腾速率

Table 4 The transpiration rate of different treatments in various growth period of cotton period				
/(mmol H ₂ O° m ⁻² · s ⁻¹)				
处理 Treatment	6月 6日	7月 19日	8月 21日	
1	11.833	8.317	7.143	
2	12.775	7.587	8.130	
3	12.167	7.840	7.483	
4	12.567	8.013	8.188	
5	11.883	7.800	8.570	
6	11.682	6.103	7.877	
7	12.583	6.130	7.740	
8	11.867	6.653	8.170	
9	11.783	8.527	7.357	
10	12.600	8.593	9.147	
11	11.538	10.527	9.093	
12	11.237	9.733	8.813	

经方差分析与 Duncan 多重比较(表 5)可以看出:在蕾期时,水分与施氮对蒸腾速率无显著影响,可能的原因是 6月 6日时,棉田还未滴头水,也没有开始滴氮肥,而基肥中所含氮肥不足以对 E 产生显著影响。开始滴水滴肥之后,肥水效应应在花铃期开始表现出来,从 7月 19日测定的结果可以看出,水分对蒸腾速率 E 的影响达到了显著水平(P<0.05),而施氮、水分与施氮的交互作用对蒸腾速率 E 无显著影响。最高滴水量(4 950 m³/hm²)与最低滴水量(2 850 m³/hm²)水平下的 E 之间在花铃期无显著差异,但是,最高滴水量(4 950 m³/hm²)水平下的蒸腾速率 E 却显著地高于中等滴水量(3 900 m³/hm²)。中等与最低滴水量之间的 E 无显著差异。灌水 4 950 m³/hm²时,蒸腾速率 E 最高,为 9.337 mmolH₂O° m⁻²· s⁻¹。当最高滴水量(4 950 m³/hm²)条件下,盛铃期 8月 21日测定的蒸腾速率 E 也显著地受到了施氮的影响,最高施氮量(360 kg/hm²N)时的蒸腾速率显著高于不施氮处理,180~ 360 kg/hm²N 施氮量范围内,

氮素对蒸腾速率无显著影响,不施氮的蒸腾速率最低,不同施氮量 kg/hm²(N)条件下蒸腾速率高低顺序为 360> 180> 270> 0,对应的蒸腾速率值分别为 9.566 9.043 8.670 6.667 mmolH₂O° m⁻²· s⁻¹。

表 5 滴水量与施氮量对棉花不同生育时期的蒸腾速率的影响

Table 5 The transpiration rate affected by drip irrigation and nitrogen in various growth period of cotton				
/(μmolCO ₂ ° mmolH ₂ O ⁻¹)				
	水平 Level	6月 6日	7月 19日	8月 21日
滴水量 /(m ³ /hm ²)	4950	11.789	9.337 _a	8.602
	3900	12.003	7.787 _{ab}	8.089
	2850	12.335	6.672 _b	7.736
施氮量 Nitrogen /(kg/hm ² N)	360	11.890	8.133	8.390
	270	12.096	8.155	8.105
	180	12.352	7.427	8.384
	0	11.833	8.012	7.690

注:滴水量对 E 的影响数据是 12 个小区的平均值,施氮量对 E 的影响数据是 9 个小区的平均值。同一列数据后标记字母不同者表示在 5% 水平具有显著差异性。

Note Values of transpiration rate affected by drip irrigation were the average of 12 plots and values affected by nitrogen application rate were the average of 9 plots. The different letter in the same list indicated significant difference at P= 0.05 level.

2.3 影响南疆膜下滴灌棉花水分利用效率与蒸腾速率的环境因子

南疆膜下滴灌棉花水分利用效率、蒸腾速率的大小与棉田冠层环境因子密切相关(表 6)。WUE 与叶片温度、空气温度、空气饱和差、胞间 CO₂ 与空气 CO₂ 浓度比呈现出极显著的负相关关系,其中与叶片温度的负相关性最大,达到了 -0.625。棉花叶片温度在 29~ 39℃ 范围内,空气温度在 30~ 41℃ 范围内,随着温度的升高,WUE 将下降。WUE 与光合有效辐射 PAR 呈显著负相关关系。说明热量因素是影响 WUE 最为重要环境因子。WUE 与空气相对湿度、空气 CO₂ 浓度呈现出极显著的正相关关系。一般来说,空气 CO₂ 浓度常处于光合作用 CO₂ 饱和点之下,因此随着空气 CO₂ 浓度的增加,净光合速率也增加,从而提高了 WUE。

叶片蒸腾速率与气孔开放度、风速、气温、空气湿度、土壤水分等因子有关。本实验条件下蒸腾速率与空气温度、叶片温度、光合有效辐射 PAR 呈现出极显著的正相关关系,说明冠层温度越高,蒸腾速率越大。蒸腾速率与空气 CO₂ 浓度、胞间 CO₂ 与

空气 CO₂ 浓度比 G /Ca呈现出极显著的负相关关系 空气相对湿度与蒸腾速率之间的相关性未达到显著水平,说明在试验棉田微域小环境内,空气相对湿度并不能影响棉花对水分的蒸腾

表 6 水分利用效率 WUE 蒸腾速率 E与环境因子的相关分析

Table 6 The correlation analysis of WUE and transpiration rate and environmental factors

相关系数 Correlation coefficient	Vpd/L	空气温度 Air temperature	叶片温度 Leaf temperature	空气相对湿度 RH	光合有效辐 射 PAR	空气 CO ₂ 浓度 CO ₂ concentration	胞间 CO ₂ 与 空气 CO ₂ 浓度比 G /Ca
与 WUE的相关系数 WUE correlation coefficient	- 0.543 *	- 0.608 *	- 0.625 *	0.543 *	- 0.119	0.424 *	- 0.282 *
与 E的相关系数 E correlation coefficient	0.027	0.664 *	0.459 *	0.012	0.231 *	- 0.613 *	- 0.284 *

V= 442, r_{0.05}= 0.098,r_{0.01}= 0.128,注* 显著; Sgnificance at 5%,* * 极显著 Sgnificance at 1% .

3 讨论

已有研究表明水分胁迫能够降低棉花产量,并影响棉花纤维的品质,任何提高水分利用效率的措施都有可能减轻水分胁迫对棉花产量、纤维品质的不利影响^[9,10]。虽然净光合速率在棉花品种之间可以相差 30%,净光合速率广义遗传力达到了 0.65,但是净光合速率与 WUE之间的相关性很差,不能用净光合速率这个参数来估计 WUE 叶片氮素含量与光密度影响棉花叶片净光合速率,从而间接地影响到 WUE的大小^[11]。

研究发现氮素水平从 0~ 360 Nkg /hm²,对水分利用效率与蒸腾速率没有显著影响,可能的原因是试验地土壤供氮水平已经很高,不足以表现出氮素亏缺的现象。据北疆大田自然条件下的试验结果,WUE日变化出现多峰现象,上午 12 00 ~ 14 00时的 P_n最高,WUE也最高,品种、土壤水分及不同的产量水平对 WUE均有影响,欠水处理的叶片 WUE低于丰水^[13]。而马富裕等研究北疆膜下滴灌棉花花铃期水分亏缺对水分利用效率的影响发现,花铃期中期水分亏缺对棉花群体光合影响最大,若将水分亏缺时段移至花铃期前期或后期,可减轻水分亏缺对群体光合效率和产量的影响,并提高水分利用效率^[12]。Teshia等发现高氮处理能使气孔密度和蒸腾速率显著降低^[14]。另外,据郑重等(2000)研究发现,限制北疆膜下滴灌棉花产量的主导因素是水分,氮素次之^[15]。本研究发现,影响膜下滴灌棉花水分利用效率 WUE与蒸腾速率 E的环境因子中,温度是主要的影响因素。由于棉花冠层温度(气温与叶温)与蒸腾速率呈极显著的正相关,当空气温度、叶温升高,会显著增加蒸腾速率,从而降低了水分利用效率。因此,在 6~ 8月空气温度较高的生长季节,适当增加滴灌水量,降低叶片温度,一方面可以增加光合

速率,同时降低蒸腾速率,从而提高水分利用效率

参考文献:

[1] 刘昌明,王会肖等. 土壤—作物—大气界面水分过程与节水调控 [M]. 北京: 科学出版社, 1999. 30~ 32

[2] 王会肖,刘昌明. 作物水分利用效率内涵及研究进展 [J]. 水科学进展, 2000, 11(1): 99~ 104.

[3] 吴海卿,杨传福,孟兆江,等. 以肥调水提高水分利用效率的生物学机制研究 [J].灌溉排水, 1998, 17(4): 6~ 10.

[4] 李世清,田霄鸿,李生秀. 养分对旱地小麦水分胁迫的生理补偿效应 [J].西北植物学报, 2000, 20(1): 22~ 28.

[5] 上官周平,周 维. 栽培条件对冬小麦叶片水分利用效率的影响 [J].植物营养与肥料学报, 1998, 4(3): 231~ 236.

[6] 李生秀,李世清,高亚军,等. 施用氮肥对提高旱地作物土壤水分利用效率的作用机理和效果 [J].干旱地区农业研究, 1994, 12(1): 38~ 46.

[7] 吕加琰,张一平,刘思春,等. 施磷水平对 SPAC水分能量特征的影响 [J].生态学报, 2000, 20(3): 255~ 263 .

[8] 张仁陟,李小刚,胡恒觉. 施肥对提高旱地农田水分利用效率的机理 [J].植物营养与肥料学报, 1999, 5(3): 221~ 226.

[9] Warwick N. Stiller, John J. *et al.*. E. Reid. Selection for Water Use Efficiency Traits in a Cotton Breeding Program [J]. Crop Sci. , 2005, 45 1107~ 1113.

[10] Y Sarange, Flash I, Yakir D. Variation in water-use efficiency and its relation to carbon isotope ratio in cotton [J]. Crop Sci. , 1998, 38 782~ 787.

[11] Stephen P. Milroy, Michael P. *et al.*. Nitrogen and Light Responses of Cotton Photosynthesis and Implications for Crop Growth [J]. Crop Sci. , 2003, 43 904~ 913.

[12] 马富裕,李蒙春,杨建荣,等. 花铃期不同时阶段水分亏缺对棉花群体光合速率及水分利用效率影响的研究 [J]. 中国农业科学, 2002, 35(12): 1467~ 1472.

[13] 姚源松主编. 新疆棉花高产优质高效理论与实践 [M]. 乌鲁木齐: 新疆科学技术出版社, 2004, 67~ 68.

[14] TESHIA A J, Kumar D. Effect of fertilizer nitrogen on drought resistance of coffee arabicaL [J]. J Agri Sci. 1978, 90 625~ 631.

[15] 郑 重,马富裕,慕自新,等. 膜下滴灌棉花水肥耦合效应及其模式研究 [J]. 棉花学报, 2000, 12(4): 198~ 201.