

膜下滴灌对不同土壤水分棉花花铃期光合生产、 分配及籽棉产量的调节

罗宏海, 李俊华, 勾玲, 张旺锋, 何在菊, 杨新军

(石河子大学农学院/新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室, 新疆石河子 832003)

摘要: 【目的】研究膜下滴灌条件下土壤水分对棉花光合物质生产、分配的调节效应, 揭示不同土壤水分对棉花对产量形成的影响机制, 为干旱区发展节水高产高效农业提供依据。【方法】在新疆气候生态条件下, 选用对水分反应敏感性不同的新陆早 10 号和新陆早 13 号为试验材料。控制 0~60 cm 土壤相对含水量滴水下限分别为田间持水量 55%、70% 和 85%, 滴水上限均为田间持水量, 采用气体交换和同位素示踪技术, 研究花铃期不同土壤水分对叶片光合速率、¹⁴C 光合产物运转和分配及产量的影响。【结果】滴水下限为 55% 处理土壤轻度水分亏缺, 叶片光合速率低, 地上部光合物质积累量少, ¹⁴C 光合产物输出较快、向蕾铃分配比例增加; 滴水下限为 70% 和 85% 处理叶片光合速率高, 地上部光合物质积累量大, 但 85% 处理 ¹⁴C 光合产物向营养器官分配的比例过大, 最终籽棉产量以 70% 处理最高, 85% 处理次之, 55% 处理最低。籽棉产量水分利用效率为 55% > 70% > 85%; 不同品种对土壤水分的响应不同, 新陆早 10 号在 55% 和 70% 条件下籽棉产量和水分利用效率显著低于新陆早 13 号, 85% 条件下显著高于新陆早 13 号。【结论】土壤水分对棉花光合物质生产、分配具有明显的调节效应, 花铃期滴水下限在 70%~85% 有利于实现棉花高产, 在 55%~70% 范围内, 棉株能通过适应性调节, 有利于提高水分利用效率。依据不同品种对土壤水分响应的差异, 结合滴灌棉田土壤水分可控性强的特点, 制定相应的灌溉制度, 对实现滴灌棉田节水高产高效具有重要意义。

关键词: 棉花; 膜下滴灌; 土壤水分; 光合速率; 同化物分配; 产量

Regulation of Under-Mulch-Drip Irrigation on Production and Distribution of Photosynthetic Assimilate and Cotton Yield under Different Soil Moisture Contents During Cotton Flowering and Boll-Setting Stage

LUO Hong-hai, LI Jun-hua, GOU Ling, ZHANG Wang-feng, HE Zai-ju, YANG Xin-jun

(College of Agriculture, Shihezi University / Key Laboratory of Oasis Ecology Agriculture of Xinjiang Production and Construction Groups, Shihezi 832003, Xinjiang)

Abstract: 【Objective】In order to provide the basis used in developing the highly productive and effective water-saving agriculture in arid area, the regulation of under-mulch-drip irrigation on production and distribution of photosynthetic assimilate and cotton yield under different soil moisture contents were studied in this paper. 【Method】Using water-sensitivity different cultivars Xinluzao 10 and Xinluzao 13, an irrigation experiment was conducted in field. Lower limit of soil relative moisture content in layer of 0-60 cm was controlled at 55%, 70% and 85% of the field capacity. Upper limit was set as field capacity. Leaf gas exchange and isotopic tracer techniques were used to investigate the change of photosynthesis, production and distribution of photosynthetic

收稿日期: 2007-06-11; 接受日期: 2008-03-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30260051, 30460063); 国家“十一五”科技支撑计划项目 (2006BAD21B02-1)

作者简介: 罗宏海 (1979-), 男, 辽宁抚顺人, 博士研究生, 研究方向为作物产量生理。E-mail: luohonghai79@163.com。通讯作者张旺锋 (1965-), 男, 甘肃静宁人, 教授, 博士, 研究方向为作物高产生理生态。Tel: 0993-2057326; E-mail: Zhwf_agr@shzu.edu.cn

assimilate and yield during flowering and boll-setting stage under different soil moisture contents. 【Result】 When the lower limit of soil relative moisture content was 55%, leaf photosynthetic rate and photosynthesis products accumulation of aerial part decreased, the speed of export percentage ^{14}C -assimilates accelerated and distribution percentage ^{14}C -assimilates in bud and boll increased. When the lower limit was 70% and 85%, leaf photosynthetic rate and photosynthesis products accumulation of aerial part were enhanced, but the distribution percentage of ^{14}C -assimilates in stem and leaf significantly increased in 85% treatment. So the seed cotton yield in 70% treatment was the highest, 85% treatment was inferior to 70% treatment, 55% treatment was the lowest, however seed cotton yield water use efficiency was $55\% > 70\% > 85\%$. The different responses to drip irrigation among varieties were great, the seed cotton yield and water use efficiency of Xinluzao 10 were significantly lower than Xinluzao 13 in 55% and 70% treatments, but that of Xinluzao 10 were higher than Xinluzao 13 in 85% treatment. 【Conclusion】 These results suggest that different soil moisture contents had significant influence on production and distribution of photosynthetic assimilate and seed cotton yield. Lower limit of soil relative moisture content of 70%–85% during flowering and boll-setting stage would work better in achieving high yield. If the lower limit of soil relative moisture content ranges between 55% and 70%, cotton plant could develop the ability of adaptation to improve water use efficiency. It will be of great importance to institute the optimum irrigation schedule according to different responses to soil moisture content among varieties to obtain high yield and high water use efficiency under-mulch-drip irrigation.

Key words: *Gossypium hirsutum* L.; Under-mulch-drip irrigation; Soil moisture content; Photosynthetic rate; Distribution of photosynthetic assimilate; Yield

0 引言

【研究意义】新疆属典型大陆型干旱气候，灌溉植棉，棉花经济产量系数高，是中国最重要的优质高产棉区。资料表明，新疆丰产田经济系数一般可达0.4~0.5，较之黄河流域与长江流域棉区的丰产田高3成左右^[1]。土壤水分不仅影响作物光合物质生产量，也改变光合产物在产品与非产品器官间分配，有利于调控作物向高产高效方向转变^[2-4]。滴灌作为先进的节水灌溉技术，可通过滴水量、滴水频率等精确控制农田土壤水分，能显著提高作物产量和水分利用效率^[5,6]；滴灌技术引入新疆后，与作物薄膜覆盖技术相结合发展成为膜下滴灌技术^[7,8]。目前新疆大面积推广棉花膜下滴灌精准灌溉技术，但生产上如何利用滴灌技术水分可控性强的特点实现棉花合理灌溉尚存在问题，滴灌棉花出现早衰或旺长的现象经常发生。因此结合膜下滴灌水分分布特点，开展土壤水分对棉株体内同化产物运转分配的调控研究，对于提高滴灌棉花经济效益、实现高产高效栽培是非常重要的。【前人研究进展】作物产量的高低不仅决定于同化产物的数量，而且决定于同化产物运转分配的效率，同化产物以干物质的形态在产品器官中累积形成产量^[9]。在作物生长发育过程中，同化物在植株各器官的转化与分配受水分状况的影响较大^[10]。研究表明，作物不同生育阶段光合产物的生产、分配和累积对水分反应的敏感性、后效性不同^[11]；在某些生育时期，减少土壤水分供应，诱导轻度至中度水分胁迫，可避免植株旺长，改变植

株体内水分和养分的分配，使同化物从营养器官向生殖器官转移，有利于经济产量的形成^[12]。在不影响光合作用的前提下，减少水分供给量，促进作物同化物向生殖器官运转，以提高产量和水分利用效率已成为现代节水农业研究中的关键问题^[13]。【本研究切入点】利用滴灌技术控制土壤水分供应，调节棉花产量形成过程中植株光合产物的生产、运转及向棉铃中的分配是实现膜下滴灌棉花高产高效的重要研究内容。花铃期是产量形成的关键时期，也是棉花需水的临界期，为棉田灌溉水管理的主要时期^[14]。然而目前有关膜下滴灌条件下不同土壤水分对棉花花铃期光合生产、分配及产量形成影响机制的研究较少。【拟解决的关键问题】本文选用对水分敏感性不同的代表性品种，在田间自然条件下，设置不同土壤水分处理，研究膜下滴灌条件下不同土壤水分对棉花花铃期光合生产、运转分配的调节效应，探讨实现滴灌棉田棉花节水高产高效的可能途径，为干旱区膜下滴灌棉田精确水分管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验概况

试验于2004~2005年在石河子大学农学院试验站(86°03'E, 45°19'N)高精度可控水防雨池中进行，每池面积为9.0 m×3.7 m，深1.5 m，不封底。土壤质地为中壤土，pH为7.54，有机质15.27 g·kg⁻¹，全氮1.05 g·kg⁻¹，碱解氮54.88 mg·kg⁻¹，速效磷19.04 mg·kg⁻¹，速效钾194 mg·kg⁻¹。土壤平均容重为1.48

$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 田间持水量为 24.64%, 地下水位埋深 10 m 以下。播前每公顷深施肥量为 N 240 kg, P 75.3 kg。两年分别于 4 月 22 日、4 月 26 日布滴灌带、铺膜后, 在膜上人工点播; 田间种植方式及管道铺设方法同大田膜下滴灌棉花, 每公顷留苗 24×10^4 株左右。

1.2 试验设计

供试棉花 (*Gossypium hirsutum* L.) 品种为两个对水分敏感性不同的新陆早 10 号和新陆早 13 号, 两品种在田间自然条件下分别表现为, 新陆早 10 号株型紧凑, 单个叶片面积小, 叶色深绿, 对水分亏缺反应敏感, 抗旱性一般; 新陆早 13 号株型较松散, 单个叶片面积大, 植株生长势较强, 对水分亏缺反应不敏感, 抗旱性较强; 两品种在北疆棉区均有较大的种植面积。

设置 3 个水分处理, 在棉花盛蕾期 (2004 年 6 月 12 日、2005 年 6 月 15 日) 控制 0~60 cm 土壤相对含水量分别为田间持水量的 55%、70% 和 85% 为滴水下限, 滴水上限均为田间持水量。采用裂区试验设计, 水分处理为主区, 品种为副区, 随机排列, 3 次重复。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 土壤容积水含量 (cm^3/cm^3) 和耗水量 (mm)

为使土壤水分达到试验设计要求, 每隔两天于傍晚时 (北京时间 20:00~22:00) 采用时域反射仪 (TDR, 美国) 测量 0~60 cm 土层的土壤含水量, 当土壤含水量下降到试验设定的滴水下限时, 及时滴水补充消耗的水分, 至田间持水量时停止滴水, 滴水量用水表和球阀控制。

滴水量的计算方法如下^[15]:

$$A = (W_p - W_a) \times H \quad (1)$$

式中, A 为滴水量 (mm), W_p 为规定滴水上限, W_a 为实测土层的平均容积水含量 (cm^3/cm^3), H 为滴水土层厚度 (mm)。

根据作物水平衡方程, 作物耗水量的计算式为:

$$Et_{1-2} = 10 \sum_{i=1}^n r_i h_i (\theta_{i1} - \theta_{i2}) + M + P + K + C \quad (2)$$

式中: Et_{1-2} 为阶段耗水量 (mm); r_i 为第 i 层土壤干容重 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$); H_i 为第 i 层土壤厚度 (cm); θ_{i1} 、 θ_{i2} 为第 i 层土壤在计算时段始末的含水量 (干土重的百分率)。M、P、K、C 分别为时段内灌水量、降雨量、地下水补给量和排水量 (mm)。结合新疆试验区条件 (无地下水和天然降雨的补给), $M=P=K=0$ 。滴灌条件下 $C=0$, 则式 (2) 变为^[16]:

$$Et_{1-2} = 10 \sum_{i=1}^n r_i h_i (\theta_{i1} - \theta_{i2}) \quad (3)$$

1.3.2 光合速率

在棉花生育中后期 (盛花期、盛铃期、吐絮期) 用 Li-6400 光合测定系统 (Li-cor, USA) 测定叶片光合速率 (P_n), 具体测定时间为出苗后 75、90、115 d; 在测定当日北京时间 10:00~12:00, 测定主茎功能叶片 (打顶前为主茎倒四叶, 打顶后依次为主茎倒三叶、倒二叶) 的 P_n 。测定时叶室温度、湿度依测定期环境温湿度的变化适当控制。不同处理采用轮回测定的方法, 每处理测定 5~8 株。

1.3.3 ^{14}C 同位素示踪

盛铃期分别对不同处理主茎功能叶及其对位果枝叶进行 ^{14}C 示踪标记。选择典型晴天上午 10:00~11:00 进行饲喂。将叶片用高透光率的聚酯膜密封, 用医用注射器向其中注入放射性活度为 2.96×10^6 Bq 的 $^{14}\text{CO}_2$, 于自然光照条件下光合作用 30 min^[17]。标记结束时用气泵将同化袋中残余气体抽出, 用浓碱液回收。标记后 3 d 取样, 将棉株按饲喂叶、根、茎、未饲喂叶、蕾铃等器官分开洗净后装袋, 105℃ 杀青 30 min, 80℃ 下烘干后称重。然后分别剪碎磨成粉状, 每个样品称 50 mg, 在实验室常温常湿条件下用 BH1216 低本底 α 、 β 测量装置测定每分钟计数 (cpm)。每个样品重复测定 3 次, 数据经本底校正后以 3 个重复的平均值进行数据分析。计算公式如下^[18]:

某器官的放射性活度 (dpm) = (cpm - 本底) / 样品质量 \times 某器官干量;

^{14}C 光合产物在各器官中的分配率 (%) = (某器官 dpm / 整株 dpm) \times 100%;

^{14}C 输出百分率 (%) = (饲喂叶以外的整株 dpm / 整株 dpm) \times 100%。

1.3.4 光合物质累积

于初花期、盛花期、盛铃期、吐絮期, 相应为出苗后 60、75、90、115 d, 每处理选取生长整齐一致的棉株 5~6 株, 将植株分解为主茎、叶、蕾铃等器官, 称鲜重, 105℃ 下杀青 30 min, 80℃ 下烘干后称重。

1.3.5 产量性状

成熟前各小区选取具有代表性植株 20 株考察单株结铃数; 收获期取下部第 2 果枝、中部第 4~5 果枝、上部第 6~8 果枝第一果节棉铃各 30 个, 供室内考种, 以小区实际收获产量记产。

1.4 数据处理

试验数据采用混合线性模型分析裂区设计的方法^[19], 检验水分、品种及水分与品种互作对试验结果的影响。

2 结果与分析

2.1 土壤水分对棉花叶片光合速率的影响

从盛花期开始, 随生育进程的推移, 棉花叶片光合速率 (P_n) 逐渐降低, 不同处理间 P_n 的变化不同 (表 1)。水分处理间 P_n 在盛花期至吐絮期均达到显著性差异, 表现为 70% 处理较高, 85% 处理次之, 55%

处理较低。品种间 P_n 在盛花期无明显差异, 盛铃期和吐絮期新陆早 10 号显著低于新陆早 13 号。水分 \times 品种互作表现为 85% 条件下新陆早 10 号显著高于新陆早 13 号, 70% 和 55% 条件下新陆早 10 号均显著低于新陆早 13 号。

表 1 土壤水分对棉花叶片光合速率 ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) 的影响

Table 1 Effect of different soil moisture contents on photosynthesis of cotton leaves at different growth stages ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)

品种 Varieties	土壤相对含水量 Soil relative moisture content (%)	生育时期 Growth stages		
		盛花期 Full flowering	盛铃期 Full bolling	吐絮期 Boll opening
新陆早 10 号 Xinluzao 10	55	25.8 \pm 1.3 e	20.2 \pm 1.5 f	16.3 \pm 0.7 f
	70	32.9 \pm 0.7 a	26.5 \pm 2.1 b	22.1 \pm 1.2 c
	85	31.2 \pm 1.4 b	25.2 \pm 1.7 c	23.7 \pm 1.8 b
新陆早 13 号 Xinluzao 13	55	27.0 \pm 0.9 d	22.5 \pm 1.3 e	20.5 \pm 1.2 d
	70	33.4 \pm 2.1 a	27.9 \pm 0.8 a	24.0 \pm 0.7 a
	85	29.5 \pm 1.5 c	23.6 \pm 1.6 d	17.9 \pm 1.4 e

字母 a、b、c 表示同一列在 $P=0.05$ 水平上显著。下同 a, b, c represent statistic significance at level of 0.05. The same as below

2.2 土壤水分对棉株光合物质累积的影响

不同水分条件下, 棉花单株地上部总光合物质累积量随土壤水分的增加而增大, 且处理间均达到极显著性差异 (表 2)。品种间, 新陆早 10 号单株地上部总光合物质累积量显著低于新陆早 13 号。水分 \times 品种

互作表现为初花期至盛花期 85% 和 70% 条件下两品种地上部总光合物质累积量无明显差异, 55% 条件下新陆早 10 号显著低于新陆早 13 号; 盛花期至吐絮期, 3 种水分条件下新陆早 10 号地上部总光合物质累积量均极显著低于新陆早 13 号。

表 2 土壤水分对棉花单株光合产物累积 (g/株) 的影响

Table 2 Effect of different soil moisture contents on single plant dry matter accumulation at different growth stages (g/plant)

品种 Varieties	土壤相对含水量 Soil relative moisture content (%)	生育时期 Growth stages			
		初花期 Early flowering	盛花期 Full flowering	盛铃期 Full bolling	吐絮期 Boll opening
新陆早 10 号 Xinluzao 10	55	17.6 \pm 6.6 d	28.9 \pm 7.0 d	42.2 \pm 4.1 f	58.5 \pm 8.9 f
	70	24.6 \pm 4.1 c	37.3 \pm 6.0 c	67.4 \pm 8.8 d	86.9 \pm 7.6 d
	85	30.1 \pm 4.0 b	48.1 \pm 3.8 b	88.2 \pm 8.4 b	121.7 \pm 9.1 b
新陆早 13 号 Xinluzao 13	55	24.4 \pm 6.3 c	34.2 \pm 4.6 c	53.1 \pm 9.2 e	72.2 \pm 7.5 e
	70	27.9 \pm 7.5 b	37.8 \pm 5.6 c	69.5 \pm 6.9 c	97.1 \pm 9.3 c
	85	33.3 \pm 4.1 a	49.9 \pm 6.1 a	93.8 \pm 7.4 a	140.4 \pm 10.0 a

2.3 土壤水分对棉花叶片 ^{14}C 光合产物运转与分配的影响

对不同处理 ^{14}C 光合产物运转与分配的测定表明 (表 3), 标记 3 d 后主茎功能叶 ^{14}C 光合产物的 40%~60% 向外运输, 且主要分配到蕾铃中。随土壤含水量的增加, 叶片 ^{14}C 光合产物的输出率降低, 但水分处理间、品种间和水分 \times 品种互作均无明显差异。不同水分条件下, ^{14}C 同化物在根、茎和叶中的分配率随

土壤水分的增加显著增加, 而蕾铃中的分配率随土壤水分的增加显著降低; 在根和蕾铃中的分配率两品种无明显差异, 茎叶中新陆早 10 号显著低于新陆早 13 号; 水分 \times 品种互作表现为: ^{14}C 同化物在根中的分配率处理间无明显差异, 茎叶中表现为 3 种水分条件下新陆早 10 号均显著低于新陆早 13 号, 蕾铃中 55% 和 70% 条件下新陆早 10 号显著低于新陆早 13 号, 85% 条件下新陆早 10 号显著高于新陆早 13 号。由此表明,

土壤水分对棉株光合产物在各器官中的分配具有明显的调节效应，但调节方式和程度随品种和器官的不同而异。

不同水分处理标记 6 d 后果枝叶 ^{14}C 光合产物输出率表现为随土壤水分的增加而显著降低，品种间无明显差异，水分 \times 品种互作表现为 55% 条件下新陆早 10 号显著低于新陆早 13 号，70% 条件下两品种无明显差异，85% 条件下新陆早 10 号显著高于新陆早 13 号（表 4）。果枝叶 ^{14}C 光合产物在器官中的分配率

表现为：在根和茎叶中的分配率随土壤水分的增加显著增加，蕾铃中随土壤水分的增加显著降低；品种间，新陆早 10 号根和茎叶中的分配率显著高于新陆早 13 号，蕾铃中两品种无明显差异。水分 \times 品种互作表现为光合产物在根中分配率处理间无明显差异；茎叶中 55% 条件下新陆早 10 号显著高于新陆早 13 号，蕾铃中显著低于新陆早 13 号；70% 和 85% 条件下两品种无明显差异。

2.4 土壤水分对棉花产量及水分利用效率的影响

表 3 土壤水分对棉花盛铃期主茎叶 ^{14}C 同化物输出及分配的影响

Table 3 Effect of different soil moisture contents on export and distribution of ^{14}C -assimilates from labeled axial leaf at full bolling stage

品种 Varieties	土壤相对含水量 Soil relative moisture contents (%)	^{14}C 同化物输出率 Export of ^{14}C -assimilates (%)	^{14}C 同化物在器官中的分配率 Distribution of ^{14}C -assimilates (%)		
			根 Root	茎叶 Stem and leaf	蕾铃 Bud and boll
新陆早 10 号	55	51.6 \pm 3.3 a	1.6 \pm 0.2 bc	3.8 \pm 0.8 d	46.1 \pm 1.6 b
Xinluzao 10	70	50.7 \pm 1.4 a	2.3 \pm 0.7 ab	5.4 \pm 0.7 c	43.1 \pm 2.3 c
	85	48.5 \pm 2.8 a	3.0 \pm 0.4 a	6.7 \pm 0.5 b	38.7 \pm 2.7 d
新陆早 13 号	55	57.5 \pm 2.6 a	0.9 \pm 0.2 c	4.9 \pm 1.0 c	51.8 \pm 3.2 a
Xinluzao 13	70	54.0 \pm 3.1 a	1.3 \pm 0.1 c	6.8 \pm 0.8 b	46.0 \pm 2.7 b
	85	47.4 \pm 4.7 a	2.1 \pm 0.4 b	12.6 \pm 0.4 a	32.7 \pm 1.4 e

表 4 土壤水分对棉花盛铃期果枝叶 ^{14}C 同化物输出及分配的影响

Table 4 Effect of different soil moisture contents on export and distribution of ^{14}C -assimilates from labeled sympodial leaf at full bolling stage

品种 Varieties	土壤相对含水量 Soil relative moisture contents (%)	^{14}C 同化物输出率 Export of ^{14}C -assimilates (%)	^{14}C 同化物在器官中的分配率 Distribution of ^{14}C -assimilates (%)		
			根 Root	茎叶 Stem and leaf	蕾铃 Bud and boll
新陆早 10 号	55	64.8 \pm 3.5 b	1.6 \pm 0.1 b	3.3 \pm 0.6 c	59.9 \pm 2.5 ab
Xinluzao 10	70	66.8 \pm 2.7 b	1.4 \pm 0.2 bc	3.7 \pm 0.4 b	61.7 \pm 1.7 ab
	85	58.6 \pm 3.1 c	2.4 \pm 0.4 a	4.5 \pm 0.4 a	51.7 \pm 4.2 bc
新陆早 13 号	55	77.8 \pm 2.3 a	1.0 \pm 0.3 c	2.3 \pm 0.3 d	74.5 \pm 3.1 a
Xinluzao 13	70	64.3 \pm 3.6 b	1.3 \pm 0.4 bc	3.6 \pm 0.6 b	59.3 \pm 1.2 ab
	85	51.9 \pm 3.9 d	2.1 \pm 0.2 a	4.8 \pm 0.2 a	44.9 \pm 2.4 c

收获期调查结果表明（表 5），不同处理间棉花单株铃数、铃重等产量因子存在明显差异。单株铃数随土壤含水量的增加而显著增加，品种间无明显差异，水分 \times 品种互作表现为 55% 条件下两品种无明显差异，70% 条件下新陆早 10 号显著低于新陆早 13 号，85% 条件下新陆早 10 号显著高于新陆早 13 号；单铃重的变化则表现为，水分处理间 70% 处理显著高于 85% 和 55% 处理，品种间新陆早 10 号显著高于新陆早 13 号，水分 \times 品种互作表现为 55% 条件下新陆早 10

号显著低于新陆早 13 号，70% 和 85% 条件下两品种无明显差异。

表 6 列出了土壤水分对棉花产量和水分利用效率的影响，数据显示不同水分条件下，籽棉产量以 70% 处理最高，其次为 85% 处理，55% 处理较低；品种间，新陆早 13 号显著高于新陆早 10 号；水分 \times 品种互作表现为 55% 和 75% 条件下新陆早 10 号显著低于新陆早 13 号，85% 条件下新陆早 10 号显著高于新陆早 13 号。地上部总生物产量水分利用效率不同水分处理间

表现为 85%处理显著高于 70%和 55%，品种间新陆早 13 号显著高于新陆早 10 号；籽棉产量水分利用效率以 70%处理最高，55%处理次之，85%处理最低；品种间新陆早 13 号显著高于新陆早 10 号；水分×品种

互作表现为 55%和 70%条件下新陆早 13 号显著高于新陆早 10 号，85%条件下新陆早 13 号显著低于新陆早 10 号。

表 5 土壤水分对棉花产量构成因子的影响

Table 5 Effect of different soil moisture contents on yield component of cotton

品种 Varieties	土壤相对含水量 Soil relative moisture contents (%)	收获株数 Plant No. of 10^4 plants·ha ⁻¹	单株铃数 No. of bolls per plant	铃重 Boll weight (g)
新陆早 10 号	55	21.5±0.3 a	4.4±0.3 d	4.1±0.2 d
Xinluzao 10	70	21.2±0.6 a	6.1±0.2 c	5.1±0.4 ab
	85	21.1±0.2 a	7.9±0.4 a	4.8±0.3 bc
新陆早 13 号	55	21.8±0.4 a	4.6±0.4 d	5.3±0.1 a
Xinluzao 13	70	21.0±0.7 a	6.9±0.5 c	5.4±0.3 a
	85	21.1±0.5 a	7.1±0.3 b	4.6±0.3 c

表 6 土壤水分对棉花产量及水分利用效率的影响

Table 6 Effect of different soil moisture contents on yield and water use efficiency of cotton

品种 Varieties	土壤相对含水量 Soil relative moisture contents (%)	耗水量 Total water consumed (mm)	地上总生物产量 Total biological yield of aerial part (10^4 kg·ha ⁻¹)	籽棉产量 Seed cotton yield (kg·ha ⁻¹)	WUE_1 (kg·ha ⁻¹)	WUE_2 (kg·ha ⁻¹)
新陆早 10 号	55	292.3±3.1 f	0.98±0.03 f	2659.3±132.2 e	42.6±1.1 d	0.91±0.02 d
Xinluzao 10	70	438.0±8.6 c	1.41±0.03 d	4681.0±125.4 b	41.7±0.7 d	1.07±0.03 c
	85	562.0±7.2 a	1.99±0.06 b	5238.0±146.3 a	46.1±1.0 c	0.93±0.02 d
新陆早 13 号	55	311.6±2.5 e	1.17±0.02 e	4176.0±108.7 d	49.9±1.0 b	1.35±0.01 a
Xinluzao 13	70	425.7±6.3 d	1.57±0.03 c	5476.5±106.6 a	49.7±0.9 b	1.28±0.02 b
	85	546.7±6.8 b	2.33±0.03 a	4515.0±114.2 c	55.2±0.9 a	0.83±0.01 e

WUE_1 和 WUE_2 分别表示地上部总生物学产量水分利用效率和籽棉产量水分利用效率

WUE_1 is calculated as total biological yield of aerial part per total water use and WUE_2 is calculated as seed cotton yield per total water use

3 讨论

棉花花铃期光合速率的高低是决定产量的关键^[20]。本试验结果表明，新陆早 10 号盛花期 70%处理 P_n 显著高于 55%和 85%处理，盛铃期至吐絮期表现为随土壤水分的增加 P_n 显著增加；新陆早 13 号盛铃期以前 P_n 为 70%处理最高，85%处理次之，55%处理最低，盛铃期以后 P_n 为 70%>55%>85%，这表明不同品种光合能力对土壤水分响应不同，新陆早 10 号 85%处理有利于延缓生育后期叶片衰老，延长叶片光合功能期；新陆早 13 号 70%处理花铃期叶片 P_n 始终处于较高水平，为棉铃的生长发育提供充足的物质供应。

资料表明，在作物一些生育期进行干旱处理，有利于同化物向产品器官中运输，能适当提高经济系数^[12,21]。本试验条件下，滴灌棉花花铃期滴水下限为 55%处理棉田，出现轻度水分亏缺，棉株 ¹⁴C 光合产

物的输出加快、向蕾铃分配比例增加，但由于地上部总光合物质累积量显著降低，导致籽棉产量显著低于 70%和 85%处理；85%处理棉田土壤水分充足，地上部总光合物质累积量大，但同化物输出率低、向茎叶分配的比例高，导致铃重显著降低；70%处理棉田土壤水分适宜，光合同化物质生产量大，同化产物运转分配效率高，有更多的同化产物分配到经济器官棉铃是其高产的原因。不同品种同化物运转分配对土壤水分响应不同，新陆早 13 号 55%条件下，主茎叶和果枝叶中 ¹⁴C 光合产物输出及向蕾铃的分配率均显著高于新陆早 10 号，表明水分亏缺下新陆早 13 号对整株叶片光合产物的调运能力强于新陆早 10 号，这可能是新陆早 13 号在水分亏缺条件下籽棉产量显著高于新陆早 10 号的主要原因。新陆早 10 号 85%条件下光合物质累积量低于新陆早 13 号，但 ¹⁴C 光合产物输出及向蕾铃分配的比例显著增加，籽棉产量显著高于新陆

早 13 号。因此,针对品种特性,通过改变滴水定额和滴水周期,在不显著降低光合速率和总光合物质累积的条件下,充分发挥品种对叶片光合产物的调运能力,促进光合产物向蕾铃运输,有利于实现棉花高产高效。

肖俊夫等^[22]在桶栽条件下的研究表明,将土壤水分控制在 12%~16.9% (田间持水量的 50%~70%),不仅有利于棉花光合作用,而且可降低植株的蒸腾、减少土壤水分的无效消耗、提高水分利用效率。俞希根等^[23]对常规灌溉条件下棉花适宜土壤水分的研究表明,花铃期土壤相对含水量在 70%~75%,有利于实现棉田节水高产。与常规地面灌溉相比,膜下滴灌技术灌水浅,属于局部湿润土壤,根系密集于土壤湿润区内,因此膜下滴灌棉花根区土壤耗水率大于常规灌溉根区土壤耗水率,而滴灌棉田土壤水分的测定主要是通过测试田间局部点的土壤水分来间接测定的,所得土壤水分资料仅反映湿润区内根区土壤水分变化^[24]。本试验条件下,滴灌棉田花铃期滴水下限为 55%条件下,籽棉产量分别比 70%和 85%降低 32.3%和 29.7%;常规灌溉花铃期土壤相对含水量为 50%~60%,籽棉产量比 70%降低 13%~19%^[23],这表明膜下滴灌条件下棉花抗旱能力较弱,受土壤干旱胁迫的可能性更大,因此,依据品种对水分需求,花铃期保持湿润区土壤相对含水量在 70%~85%有利于优质高产高效。

4 结论

膜下滴灌棉田花铃期滴水下限为 55%的处理,棉田水分亏缺,叶片光合速率低,地上部光合物质积累量少,棉株可能通过加速同化物的输出、增加光合产物向蕾铃的分配来适应水分亏缺的逆境;滴水下限为 70%和 85%的处理,叶片光合速率高,地上部光合物质积累量大,但 85%处理 ¹⁴C 光合产物向营养器官分配的比例过大。最终籽棉产量以 70%处理最高,85%处理次之,55%处理最低;地上部总生物学产量水分利用效率表现为 85%处理显著高于 55%和 70%处理,籽棉产量水分利用效率为 70%>55%>85%。棉花产量形成期通过合理的灌溉,协调棉花营养生长和生殖生长的关系,在提高总干物质累积的基础上,提高经济系数和水分利用率,获得高产高效。

不同品种对土壤水分的响应不同,新陆早 10 号在土壤水分亏缺条件下,叶片光合速率明显降低、生育后期下降快;¹⁴C 同化物向蕾铃分配的比例显著增加,但地上部总光合物质积累量下降幅度大,籽棉产量显

著降低;而新陆早 13 号在土壤水分充足条件下,地上部总光合物质积累量大,但光合产物向茎叶分配比例高,影响了光合产物向棉铃的运输。因此,膜下滴灌棉田花铃期土壤相对含水量下限在 70%~85%有利于实现高产;相对含水量下限在 55%~70%范围内,通过调节土壤水分,有利于提高水分利用效率。

References

- [1] 中国农业科学院棉花研究所. 中国棉花栽培学. 上海: 上海科学技术出版社, 1983: 66-67.
Cotton Research Institute of Chinese Academy of Agricultural Sciences (eds). *Cotton Cultivation in China*. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishing House, 1983: 66-67. (in Chinese)
- [2] 李凤民, 郭安红, 雒梅, 赵松岭. 土壤深层供水对冬小麦干物质生产的影响. 应用生态学报, 1997, 8(6): 575-579.
Li F M, Guo A H, Luo M, Zhao S L. Effect of water supply from deep soil on dry matter production of winter wheat. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1997, 8(6): 575-579. (in Chinese)
- [3] 冯广龙, 罗远培, 杨培岭. 节水灌溉对冬小麦干物质分配、灌浆及水分利用率的影响. 华北农学报, 1998, 13(2): 11-17.
Feng G L, Luo Y P, Yang P L. Effects of water-saving irrigation on dry matter partitioning, filling and water use efficiency. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 1998, 13(2): 11-17. (in Chinese)
- [4] 杜太生, 康绍忠, 胡笑涛, 杨秀英. 根系分区交替滴灌对棉花产量和水分利用效率的影响. 中国农业科学, 2005, 38(10): 2061-2068.
Du T S, Kang S Z, Hu X T, Yang X Y. Effect of alternate partial root-zone drip irrigation on yield and water use efficiency of cotton. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(10): 2061-2068. (in Chinese)
- [5] Wanjura D F, Upchurch D R, Mahan J R, Burke J J. Cotton yield and applied water relationships under drip irrigation. *Agricultural Water Management*, 2002, 55: 217-237.
- [6] Cetin O, Bilgel L. Effects of different irrigation methods on shedding and yield of cotton. *Agricultural Water Management*, 2002, 55: 1-15.
- [7] 徐飞鹏, 李云开, 任树梅. 新疆棉花膜下滴灌技术的应用与发展的思考. 农业工程学报, 2003, 19(1): 25-27.
Xu F P, Li Y K, Ren S M. Investigation and discussion of drip irrigation under mulch in Xinjiang Uygur autonomous region. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2003, 19(1): 25-27. (in Chinese)
- [8] 马富裕, 周治国, 郑重, 郑旭荣, 李明思, 李正尚, 张卫国, 邢明亮, 夏东利. 新疆棉花膜下滴灌技术的发展与完善. 干旱地区农业研究, 2004, 22(3): 202-208.
Ma F Y, Zhou Z G, Zheng Z, Zheng X R, Li M S, Li Z S, Zhang W G,

- Xing M L, Xia D L. The development and improvement of drip irrigation under plastic film on cotton. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2004, 22(3): 202-208. (in Chinese)
- [9] Fader G M, Koller H R. Relationships between carbon assimilation, partitioning, and export in leaves of two soybean cultivars. *Plant Physiology*, 1983, 73: 297-303.
- [10] Sheikholeslam S N, Currier H B. Effect of water stress on turgor differences and ^{14}C -assimilate movement in phloem of *Ecballium elaterium*. *Plant Physiology*, 1977, 59: 381-383.
- [11] 张洪业. 土壤水资源研究的两个重要方面及在农业节水中的意义—华北黄河以北平原为例. *资源科学*, 1999, 21(6): 29-33.
- Zhang H Y. Two important aspects in the research on soil water resources and their significance to water-saving agriculture—Taking plain area north of Huanghe river in north China as an example. *Resources Science*, 1999, 21(6): 29-33. (in Chinese)
- [12] Yang J, Zhang J, Wang Z, Zhu Q, Wang W. Remobilization of carbon reserves in response to water deficit during grain filling of rice. *Field Crops Research*, 2001, 71: 47-55.
- [13] 罗远培. 作物水分利用效率的调节. 见: 邹崎, 王学臣主编. 作物高产高效生理学研究进展. 北京: 科学出版社, 1996: 203-212.
- Luo Y P. Water use efficiency of crop plants. In: Zhou Q, Wang X C (eds). *Research Advance in the Study of Physiological Bases of High Yielding and High Efficient Agriculture*. Beijing: Science Press, 1996: 203-212. (in Chinese)
- [14] 马富裕, 李蒙春, 杨建荣, 季新疆, 申屠向东, 陶会俊. 花铃期不同时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. *中国农业科学*, 2002, 35(12): 1467-1472.
- Ma F Y, Li M C, Yang J R, Ji X J, Shentu X T, Tao H J. A study of effect of water deficit of three period during cotton anthesis on canopy apparent photosynthesis and WUE. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(12): 1467-1472. (in Chinese)
- [15] 李运生, 王菱, 刘士平, 王吉顺. 土壤-根系界面水分调控措施对冬小麦根系和产量的影响. *生态学报*, 2002, 22(10): 1680-1687.
- Li Y S, Wang L, Liu S P, Wang J S. The influence of different amounts of water supplied at different depths in soil-root interface on root distribution and yield of winter wheat. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(10): 1680-1687. (in Chinese)
- [16] 刘建军, 陈燕华, 李明思. 膜下滴灌棉花植株耗水率与土壤水分的关系. *棉花学报*, 2002, 14(4): 200-203.
- Liu J J, Chen Y H, Li M S. Relationship between soil moisture and cotton transpiration under mulch trickle irrigation. *Acta Gossypii Sinica*, 2002, 14(4): 200-203. (in Chinese)
- [17] Cruz-Aguado J, Reyes F, Rodes R, Perez I, Dorado M. Effect of source-to-sink ration and partitioning of dry matter and ^{14}C -photoassimilates in wheat during grain filling. *Annals of Botany*, 1999, 83: 655-665.
- [18] 徐迎春, 李绍华, 孔兰静. 水分胁迫后复水对苹果结果树体内 ^{14}C -光合产物分配的影响. *核农学报*, 2003, 17(1): 41-45.
- Xu Y C, Li S H, Kong L J. Effects of rewatering water stress on partitioning of ^{14}C -labelled photoassimilate in mature apple tree. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 2003, 17(1): 41-45. (in Chinese)
- [19] Rajcan I, Tollenaar M. Source: sink ratio and leaf senescence in maize: I. Dry matter accumulation and partitioning during grain filling. *Field Crops Research*, 1999, 60: 245-253.
- [20] Bange M P, Milroy S P. Growth and dry matter partitioning of diverse cotton genotypes. *Field Crops Research*, 2004, 87: 73-87.
- [21] 陈晓远, 罗远培. 开花期复水对受旱冬小麦的补偿效应研究. *作物学报*, 2001, 27(4): 513-516.
- Chen X Y, Luo Y P. Study on the compensatory effect of rewatering during the flowering stage after previous water stress in winter wheat. *Acta Agronomica Sinica*, 2001, 27(4): 513-516. (in Chinese)
- [22] 肖俊夫, 刘祖贵, 孙景生, 段爱旺, 张寄阳. 不同生育期干旱对棉花生长发育及产量的影响. *灌溉排水*, 1999, 8(1): 23-27.
- Xiao J F, Liu Z G, Sun J S, Duan A W, Zhang J Y. Influences of water stress at different growing stages on growth, development and yield in cotton. *Irrigation and Drainage*, 1999, 8(1): 23-27. (in Chinese)
- [23] 俞希根, 孙景生, 肖俊夫, 刘祖贵, 张寄阳. 棉花适宜土壤水分下限和干旱指标研究. *棉花学报*, 1999, 11(1): 35-38.
- Yu X G, Sun J S, Xiao J F, Liu Z G, Zhang J Y. A study on drought indices and lower limit of suitable soil moisture of cotton. *Acta Gossypii Sinica*, 1999, 11(1): 35-38. (in Chinese)
- [24] 李明思, 马富裕, 郑旭荣, 胡晓棠. 膜下滴灌棉花田间需水规律研究. *灌溉排水*, 2002, 21(1): 58-60.
- Li M S, Ma F Y, Zheng X R, Hu X T. Cotton water requirement on field with trickle irrigation under plastic film and on field with furrow irrigation. *Irrigation and Drainage*, 2002, 21(1): 58-60. (in Chinese)