

网络出版日期:2017-10-18

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1220.S.20171018.1733.014.html>

调亏灌溉对滴灌棉花光合生产的调节补偿效应

范志超¹, 张巨松¹, 石俊毅², 田立文², 林涛², 郭仁松²

(1. 新疆农业大学, 教育部棉花工程研究中心, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆农业科学院 经济作物研究所, 乌鲁木齐 830091)

摘要 在新疆自然生态条件下, 利用膜下滴灌技术, 以正常灌溉量(CK)为对照, 设正常灌溉量的75%、50%、25% 3个亏缺处理, 研究调亏灌溉对棉花光合生产的调节补偿效应, 旨在为新疆棉花节水灌溉和高产栽培提供理论依据。结果表明, 调亏灌溉改变土层水垂直分布特征, 盛蕾期重度调亏有利于棉株地上部与根系的干物质合理分配。灌水带来的补偿效应受到调亏程度和生育时期的双重影响, 在盛蕾期、盛花期和吐絮期较显著, 而盛铃期则对水分的敏感程度较低。重度调亏显著降低棉叶净光合速率(P_n)、最大光化学效率(F_m/F_v), 灌水后无法恢复到对照水平。因此, 分析认为盛蕾期中度调亏; 盛花期由于棉花光合处于峰值且灌水带来的光合补偿效应较高, 在盛蕾期调亏的基础上, 不宜再进行调亏处理; 盛铃期由于光合的补偿效应下降, 调亏处理有利于缩短棉花生长期, 可进行轻度调亏; 吐絮期由于灌水的补偿效应较高, 导致棉花贪青晚熟, 结合实际生产, 宜进行重度调亏。

关键词 棉花; 土壤含水量; 净光合速率; 皮棉产量

中图分类号 S562

文献标志码 A

文章编号 1004-1389(2017)10-1461-09

新疆属极端干旱地区, 水资源贫乏和分布不均一直是制约新疆农业发展的瓶颈, 发展节水农业实现水资源的合理高效利用, 是新疆农业可持续发展的必然选择^[1-2]。膜下滴灌技术的引入降低了农田水耗^[3], 但该地区水资源匮乏的问题依然严峻, 调亏灌溉(Regulated deficit irrigation)技术应运而生。它通过人为对作物施加一定的水分胁迫以影响植物的生理生化过程, 以期取得较高的经济产量^[4]。而研究调亏灌溉对滴灌棉花(*Gossypium hirsutum* L.)光合生产的调节效应, 是对干旱区滴灌棉花实现节水增产管理的前提, 在生产实践中具有重要意义。

研究表明, 调亏灌溉通过改变土层水的时空分布特征, 对作物的光合生产进行调控^[5-6], 植物在水分亏缺条件下棉叶的净光合速率、最大光化学效率降低, 而非光化学猝灭系数升高, 干旱复水后第3天棉叶的净光合速率、最大光化学效率达到最大值^[7-8]。适度水分亏缺通过调节营养器官与生殖器官的干物质分配比例^[9], 来提高棉花的经济产量^[10]。

对植物补偿性光合的产生条件、发生过程、内部机制的研究能够深入了解环境胁迫过程中植物的适应特点与规律^[11]。目前, 有关干旱对棉花叶片光合作用影响的研究较多^[12-13], 但是在调亏灌溉过程中灌水对棉花光合生产的调节补偿效应尚鲜见报道。为此, 本试验着重研究调亏灌溉模式下灌水对棉花光合生产的调节补偿效应, 为新疆棉花节水灌溉和高产栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2015年4月至10月在新疆阿克苏地区阿瓦提县长绒棉研究开发中心试验基地进行。该区年平均气温10.8℃, ≥ 10 ℃年有效积温3953℃, 全年日照时数2505~3136h, 无霜期长达190~251d, 年均降水量80.4mm, 属暖温带大陆性干旱气候。试验地土质为砂壤土, 0~60cm土壤平均体积质量1.43g·cm⁻³, 0~20cm土层土壤有机质8.3g·kg⁻¹, 全氮6.2g·kg⁻¹, 碱解氮38.8mg·kg⁻¹, 速效磷42.5

收稿日期:2017-02-10 修回日期:2017-05-04

基金项目:国家“十二五”科技支撑计划项目(2014BAD11B02);新疆维吾尔自治区“十二五”科技支撑项目(201231102)。

第一作者:范志超,男,硕士研究生,研究方向为棉花生理生态。E-mail:285686664@qq.com

通信作者:张巨松,男,教授,研究方向为作物高产栽培生理生态。E-mail:xjndzjs@163.com

mg · kg⁻¹,速效钾 278 mg · kg⁻¹。

1.2 试验设计

供试品种为‘中棉所 49 号’,由新疆农科院经济作物研究所提供。在施肥量一致条件下,采用单因素随机区组设计试验,自棉花现蕾一吐絮设置 4 个灌水定额,以正常灌水量为对照(3 300 m³ · hm⁻²),设 3 个亏缺梯度,轻度调亏(正常灌水的 75%,2 475 m³ · hm⁻²),中度调亏(正常灌水的 50%,1 650 m³ · hm⁻²),重度调亏(正常灌水的 25%,825 m³ · hm⁻²),分别以 CK、W75、W50、W25 表示,重复 3 次,共 12 个小区,灌溉方

式如表 1 所示。于 4 月 25 日播种,进入现蕾期(6 月 16 日)即开始灌水,每隔 7~8 d 滴灌 1 次。

滴水量用水表和球阀控制,滴头间距为 10 cm,滴头流量为 3.20 L · h⁻¹。棉花的行距配置为宽窄行[(30 cm+40 cm+30 cm)+60 cm];株距为 10 cm,基本苗为 18.91 万株 · hm⁻²;采用 1.4 m 宽膜种植,1 膜 4 行,每小区 3 膜 12 行,小区面积 7 m×4.5 m=31.5 m²,地下水埋深 3 m,前茬作物为棉花,其他田间管理措施同当地大田膜下滴灌棉花(7 月 19 日打顶)。

表 1 灌溉定额及分配

Table 1 Irrigation quota and distribution

m³ · hm⁻²

处理 Treatment	灌溉定额 Irrigation quota	灌溉时间 Irrigation date									
		蕾期 Budding stage			花铃期 Blossoming and boll forming stage					吐絮期 Boll opening stage	
		06-16	06-23	07-01	07-08	07-15	07-22	07-29	08-05	08-13	09-06
CK	3 300	200	200	200	350	350	350	450	450	450	300
W75	2 475	150	150	150	262.5	262.5	262.5	337.5	337.5	337.5	225
W50	1 650	100	100	100	175	175	175	225	225	225	150
W25	825	50	50	50	87.5	87.5	87.5	112.5	112.5	112.5	75

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤体积含水量 采用 TRIME-PICO-IPH TDR 剖面土壤水分测量系统分别在盛蕾期(06-23)、盛花期(07-15)、盛铃期(08-05)和吐絮期(09-06)灌水前 1 d 和灌水后第 3 天 10:00—10:30 测定各处理小区同一水平线上宽行、窄行、膜间 3 点的 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm 土壤体积含水量,各处理的土壤体积含水量为宽行、窄行、膜间 3 点的平均值。

1.3.2 净光合速率 选定各处理代表性植株 5 株,挂牌标记后,在 11:00—13:00 使用 TPS-2 型便携式光合仪测定棉株主茎功能叶(打顶前倒四,打顶后倒三叶)的净光合速率,日期同土壤含水量测定。

1.3.3 叶绿素荧光参数 用 PAM2100 调制式荧光仪测定棉株标记叶片的叶绿素荧光参数(日期同土壤含水量测定)。选择 11:00—13:00,在自然光强下叶片的同一部位打一个强饱和脉冲光(4 000 μmol · m⁻² · s⁻²),脉冲时间 0.7 s,测定非光化学猝灭系数(NPQ);再用暗适应叶夹在同一测量部位使叶片暗适应 30 min 后,打一个强饱和脉冲光(4 000 μmol · m⁻² · s⁻²),脉冲时间 0.7 s,测定最大光化学效率(F_v/F_m)。

1.3.4 干物质及根冠比测量 自现蕾开始每过 10~15 d,挑取各处理有代表性植株 5 株,将采集回的棉株分根、茎、叶、蕾花铃等器官分开,105 ℃ 杀青 30 min 后再降至 80 ℃ 条件下烘至恒质量,测定其干物质量,并用 Logistic 方程进行模拟。

根冠比=地下部干质量/地上部干质量

1.3.5 产量及灌溉水利用效率(IWUE) 完全吐絮后实数各小区处理的收获株数、单株结铃数,并取 180 个吐絮铃(上、中、下果枝各 60 个)测其铃质量,轧花后测算衣分,并计算皮棉产量。

IWUE=皮棉产量/滴灌总额

1.4 数据统计与分析

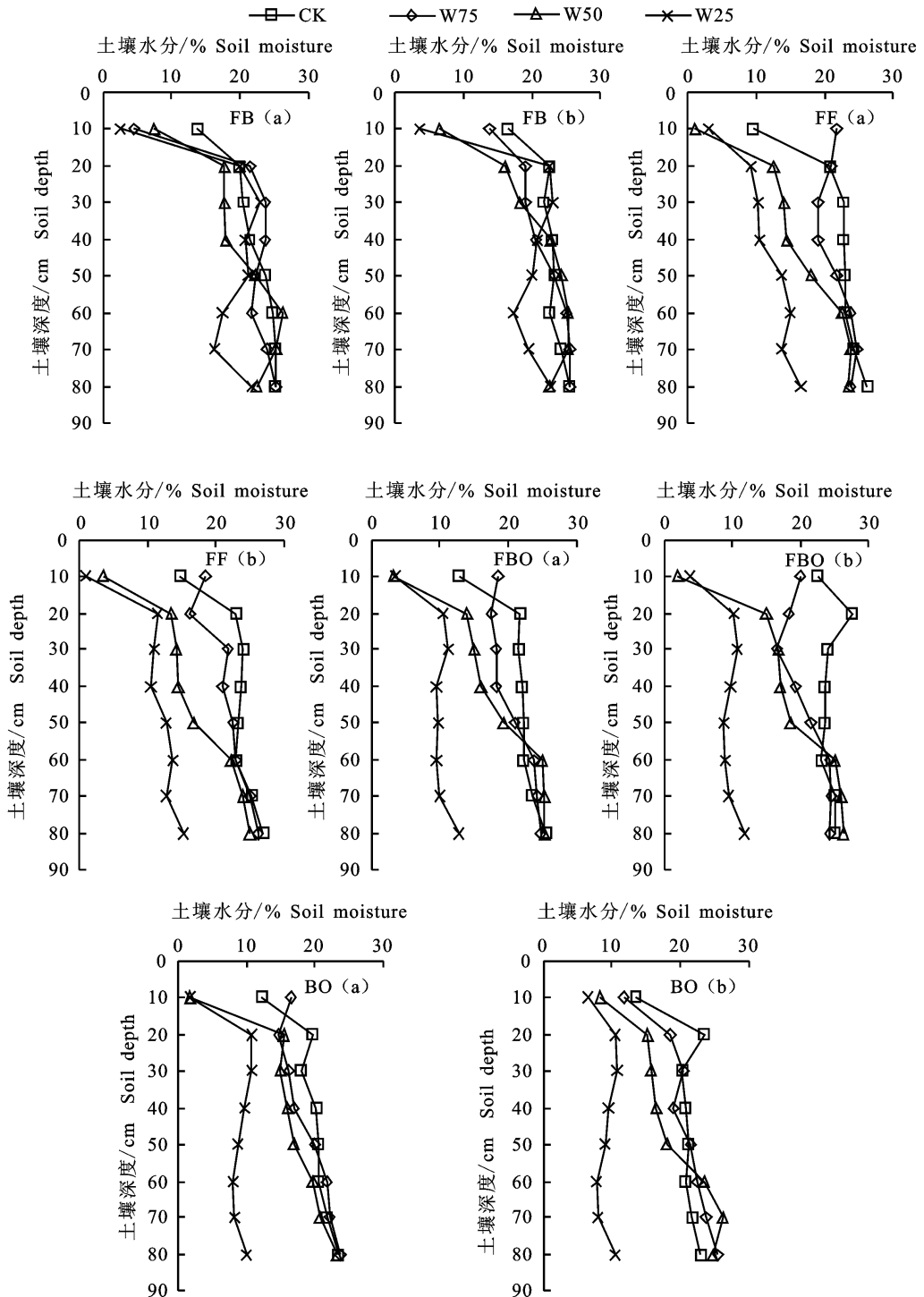
采用 Excel 2013、SPSS 19 进行分析并作图,方差分析均为 0.05 水平(LSD 法)。

2 结果与分析

2.1 调亏灌溉对棉田土壤含水量的影响

由图 1 可知,随着调亏程度的加深,棉花根系逐渐向土层深处索取水分。灌水前,不同生育时期 CK 土层水分特征呈“S”形,W75 处理由“S”形向直线转变,W50 处理呈“M”形,而 W25 处理在盛蕾期及盛花期呈“多峰”特性,在盛铃期和吐絮期呈“S”形。灌水后,各调亏处理均表现出 0~20

cm 土层土壤含水量变化较大, 20~80 cm 土层土壤含水量与灌水前基本一致。



FB, 盛蕾期 Full budding stage; FF, 盛花期 Full flowering stage; FBO, 盛铃期 Full boll stage; BO, 吐絮期 Boll opening stage; a. 灌水前 Before irrigation; b. 灌水后 After irrigation; 下同 The same below

图 1 调亏灌溉对土壤含水量的影响

Fig. 1 Effect of regulated deficit irrigation on soil water mass fraction

2.2 调亏灌溉对棉花根冠比的影响

由图 2 可知, 不同水分处理棉花根冠比随生育进程呈先增后减趋势。蕾期随着灌水量的减

少, 棉花向根系分配的干物质比例逐渐增加, 各处理与 CK 差异显著, 表明蕾期水分亏缺对地上部生长的限制大于根系。花期由营养生长向生殖生

长转移,棉花向根系干物质的分配比例开始降低。盛花期、盛铃期和吐絮期,均表现为CK与W25处理根冠比较大。

2.3 调亏灌溉对灌水前后棉叶净光合速率的影响

净光合速率(P_n)的大小可以反映出棉花叶片光合作用能力的强弱。如图3所示,各处理灌水前后净光合速率变化趋势均为单峰曲线,至盛

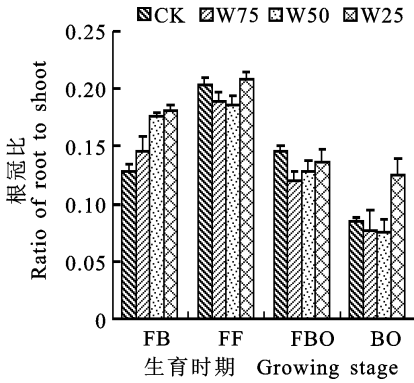


图2 调亏灌溉下棉花的根冠比

Fig. 2 Cotton ratio of root on shoot under regulated deficit irrigation

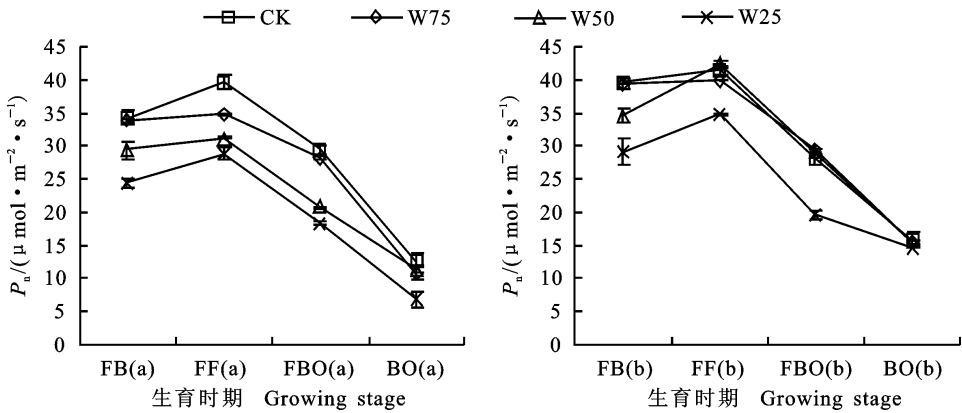


图3 调亏灌溉下灌水前后棉叶的 P_n

Fig. 3 P_n in cotton leaves before and after irrigation under regulated deficit irrigation

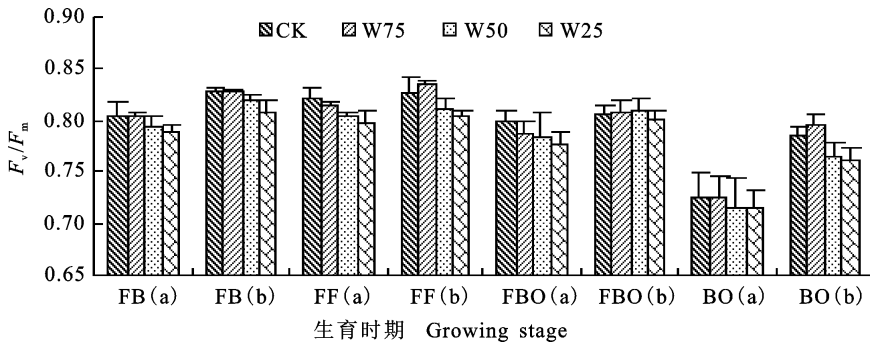
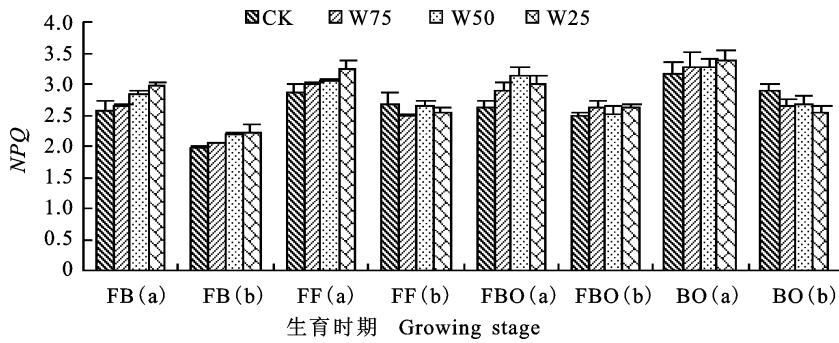
2.4 调亏灌溉对灌水前后叶面叶绿素荧光特征的影响

2.4.1 最大光化学效率 最大光化学效率 (F_v/F_m)反映PS II原初最大光化学效率。由图4可知,各处理 F_v/F_m 在盛花期达到最大值,随后逐渐降低。灌水前,除盛铃期W50处理比CK高外,其他处理 F_v/F_m 均随调亏程度逐渐增大呈下降趋势。灌水后,各处理 F_v/F_m 显著提高,盛花期、盛铃期、吐絮期W75均高于CK。说明盛花期是棉花PS II原初最大光化学效率最高的阶段,轻度调亏在灌水后补偿效应明显,有利于原初光合效率的提高,而调亏程度加大, F_v/F_m 显著降

花期达最大值,随后降低。盛蕾期,灌水前W50和W25处理 P_n 均显著低于CK, W75处理与CK无显著差异。灌水后, W50、W25处理难以恢复到CK水平,处理间差异与灌水前相同,各处理 P_n 比灌水前显著提高15%~20%,提高程度为W25>W50>W75>CK;盛花期,灌水前处理间 P_n 随灌水定额减少而降低,各处理呈显著性差异。灌水后,处理间W25处理 P_n 与CK达到显著水平, W75、W50处理 P_n 与CK差异不显著, W75、W25分别比灌水前 P_n 提高36%和20%;盛铃期,灌水前W50与W25处理 P_n 显著低于CK, W75处理与CK差异不显著。灌水后,处理间W25处理 P_n 显著低于CK, W75、W50处理与CK差异不显著, W50比灌水前显著提高39%,其他处理与灌水前相比差异不显著;吐絮期,灌水前W25处理 P_n 显著低于CK, W75、W50与CK无显著差异。灌水后,处理间无显著差异,各处理 P_n 比灌水前显著提高25%~112%,提高程度为W25>W75>W50>CK。

低 ($P < 0.05$)。

2.4.2 非光化学猝灭系数 非光化学猝灭系数 (NPQ),是PS II天线色素吸收的不能用于光合电子传递而以热能的形式耗散掉的光能部分,反映光系统对过剩光能的耗散能力。由图5可知,随着生育进程推移,棉叶逐渐衰老, NPQ 不断增高,在吐絮期达到最大。灌水前,除盛铃期W50处理较高外, NPQ 随调亏程度加重而升高。灌水后能显著降低各处理 NPQ ,在盛花期和盛铃期W75处理灌水后低于CK。说明轻度调亏在灌水后可减少叶片非辐射能量的耗散,将捕获的光能充分的用于光合作用,有利于产量的提高。

图 4 调亏灌溉下灌水前后棉叶的 F_v/F_m Fig. 4 F_v/F_m in cotton leaves before and after irrigation under regulated deficit irrigation图 5 调亏灌溉下灌水前后棉叶的 NPQ Fig. 5 NPQ of cotton leaves before and after irrigation under regulated deficit irrigation

2.5 调亏灌溉对棉花总干物质积累的影响

干物质积累是棉花产量形成的基础^[7]。如表 2 所示,对不同处理棉花干物质积累情况进行 Logistic 方程模拟,效果较好。随着调亏程度加深,不同处理指标 V_m 、 t_1 、 GT 均呈现先增高后降低的变化趋势,而 Δt 则刚好相反。其中, W50 与 CK 的干物质积累特征较为接近, W25 比 CK 及其他处理的干物质积累最大速率出现时间 t_0 和干物质积累起始时间 t_1 分别提前 7~10 d 及 14~17 d,干物质快速积累持续时间 Δt 较 CK 和

W75 分别延长 12、23 d。W75 的干物质最大增长速率 V_m 比 CK 和 W25 分别高 37% 和 69%,干物质增长特征值 GT 比 CK 和 W25 分别高 12%、75%。结果表明,重度干旱能够促使干物质积累最大速率出现时间 t_0 以及第一拐点 t_1 提前,延长干物质快速积累的持续天数,轻度干旱虽然缩短干物质快速积累的持续时间,但增加干物质最大增长速率,最终导致 W75 具有最大的干物质积累特征值。

表 2 棉花总干物质积累的 Logistic 模型及其特征值

Table 2 Logistic equations and their eigen values of dry matter accumulation of cotton

处理 Treatment	方程 Equation	相关系数(R^2) Correlation coefficients	$V_m/$ ($g \cdot d^{-1}$)	t_0/d	t_1/d	t_2/d	$\Delta t/d$	GT/g
CK	$y=341.73/[1+e^{(5.206-0.052t)}]$	0.98	4.76	100	75	125	50	225.02
W75	$y=366.44/[1+e^{(6.991-0.071t)}]$	0.98	6.51	99	78	117	39	251.58
W50	$y=340.78/[1+e^{(5.275-0.052t)}]$	0.99	4.86	102	76	127	51	228.71
W25	$y=218.48/[1+e^{(3.863-0.042t)}]$	0.98	3.85	92	61	124	62	143.86

注: t : 棉花出苗后的时间; y : 棉花干物质积累量; t_0 : 干物质积累最大速率出现时间; t_1 和 t_2 分别为 Logistic 生长函数的两个拐点; Δt : 干物质快速积累持续时间; V_m : 干物质最大增长速率; GT : 干物质积累特征值。

Note: t : days after emergence of cotton; y : cotton dry matter accumulation; t_0 : days of maximum dry matter accumulation rate occurred; t_1 and t_2 are two inflexions of logistic equations, respectively; Δt : continued days of dry matter rapid accumulation; V_m : maximum increase rate of dry matter; GT : characteristics of dry matter accumulation.

2.6 调亏灌溉对棉花产量的影响

由表 3 可知,处理间单株有效铃数、衣分、皮棉产量及灌溉水利用效率存在显著性差异。其中,单株有效铃数,W75 处理的单株有效铃数比 CK 高 8%,比 W25 处理高 27%。单铃质量,W25 比 CK 低 15%,W75 和 W50 处理与 CK 无显著

性差异。各处理衣分值表现为 $CK > W75 > W50 > W25$ 。皮棉产量各处理间达到显著性差异,表现为 $W75 > CK > W50 > W25$ 。灌溉水利用效率随灌水量增加而减少,W75、W50、W25 处理分别比 CK 高 40%、88%、190%。

表 3 不同处理棉花的产量及产量构成因素

Table 3 Lint yield and yield component of cotton under different treatments

处理 Treatment	收获密度($\times 10^4$)/ hm^{-2} Harvested density	单株有效铃数 Effective bolls No. per plant	单铃质量/g Boll mass	衣分/% Lint percentage	皮棉产量/ ($kg \cdot hm^{-2}$) Lint yield	WUEI/ ($kg \cdot m^{-3}$)
CK	19.73 a	5.72 a	5.76 a	43.24 a	2 810.09 a	0.85 a
W75	19.41 a	6.21 b	5.71 a	42.91 a	2 953.33 b	1.19 b
W50	19.36 a	5.78 a	5.66 a	41.69 b	2 640.47 c	1.60 c
W25	19.89 a	4.88 c	5.23 b	40.15 c	2 038.18 d	2.47 d

注:同列数据后标小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters represent significant difference ($P < 0.05$).

3 讨论

调亏灌溉通过水分调亏及灌水后带来的补偿或超补偿效应调节作物光合生产效率和改善植株营养生长与生殖生长的干物质分配比例,最终影响作物的经济产量。燕鹏等^[14]认为减少灌溉量可以提高胡麻对土壤水的吸收利用,提高了水分利用效率,避免水资源的无效浪费。孟兆江等^[15]用盆栽法研究认为水分亏缺对棉花根系干质量增长速率具有促进作用,与对照相比达显著水平。本试验结果基本与之相符,土壤水含量保持在 21% 左右时,棉株根系主要为横向生长,吸收 0~30 cm 土层水分,难以有效利用土壤深层水分,降低了水分利用效率;重度调亏下,土壤水含量保持在 10% 左右,根冠比增高,根系过分下扎,吸收 0~80 cm 土层水分,但是土壤水难以有效补给;轻度和中度调亏下,根冠比较为合理,吸收 0~50 cm 土层水分,但轻度调亏下灌溉水补充更为及时。同时本试验认为棉花根冠比主要受生育时期的影响,调亏程度不会改变棉株根系与地上部干物质分配的整体趋势,营养生长阶段水分亏缺对地上部生长的限制大于根系,而生殖生长阶段,适度水分亏缺有利于避免棉花向根系过度分配光合产物,为高产创造有利条件。

刘瑞显等^[16]研究认为水分调亏阶段显著降低了棉叶的 P_n ,这与本研究结果不完全一致。本研究中,灌水前,轻度调亏处理(土壤含水量在 18% 左右)除在盛花期与 CK 差异达到显著水平,

其他时期均不显著;中度和重度调亏与 CK 达到显著水平。灌水后,轻度和中度调亏能够恢复到 CK 水平。灌水带来的补偿效应受到调亏程度和生育时期的双重影响,蕾期、盛花期、盛铃期、吐絮期土壤含水量保持在 16%、18%、12%、8% 左右有利于获得较高的光合补偿效应。整体来看土壤水含量保持在 18% 左右时,对棉叶 P_n 的减益效果最小。

随着水分亏缺程度的增大,棉叶 F_v/F_m 下降速度加剧,这与吴甘霖等^[17]研究结果一致。灌水后 F_v/F_m 均有不同程度提升,轻度调亏 F_v/F_m 能够恢复到对照水平;中度调亏仅在盛铃期恢复到 CK 水平;重度调亏 F_v/F_m 与 CK 相比达到显著水平。说明轻度和中度调亏暂时抑制了 PS II 反应中心的光化学活性,灌水后抑制作用得到解除,但由于中度调亏灌水量难以满足正常生理需求,导致在盛蕾期和盛花期仍受到一定程度的水分胁迫,而盛铃期由于对水分敏感度较低所以中度调亏 F_v/F_m 能够恢复到 CK 水平。

水分调亏下光合机构可通过热耗散水平的增加来保护光合机构^[18]。本试验结果显示:随着调亏程度的增加, NPQ 逐渐升高。灌水后,棉叶 NPQ 均有一定程度的降低,但盛铃期 NPQ 降低幅度较小,CK 与灌水前差异不显著。这也佐证了盛铃期对水分敏感程度降低,这可能是由于盛铃期棉株通过将灌溉水和露水储存在棉铃内所致。重度调亏(土壤含水量在 10% 左右)光合虽然降低,但 NPQ 并未显著升高,说明叶片非辐射

能量的耗散能力下降,已经对 PS II 反应中心造成不可逆的损伤。

吴凤全等^[19]研究认为合理的水分调亏可提高棉花干物质最大积累速率和干物质累积量。史文娟等^[20]研究认为适度的水分调亏可使经济产量能够接近甚至高于对照。吉恒莹等^[21]研究认为过多或过少的灌溉定额均会造成棉铃脱落严重。这与文中研究结果一致。不同处理间,轻度调亏具有最高的干物质累积量、有效结铃数和经济效益。灌水带来的补偿效应在蕾期、花期和吐絮期比较显著,这可能是轻度调亏模式下依然保持较高干物质累积量的原因所在,而花期优异的光合补偿效应有助于棉花开花坐果,最终达到节水高产的目的。

4 结 论

调亏灌溉改变了土层水分垂直分布特征,轻度调亏下土壤水含量保持在 18% 最合理,能够有效挖掘棉花光合生产潜力。盛蕾期水分亏缺有利于棉花根部下扎,可进行中度调亏;盛花期由于棉花光合处于峰值且灌水带来的光合补偿效应较高,在蕾期调亏的基础上,不宜再进行调亏处理;盛铃期由于光合的补偿效应下降,调亏处理有利于缩短棉花生长周期,可进行轻度调亏;吐絮期由于灌水的补偿效应较高,导致棉花贪青晚熟,结合实际生产,宜进行重度调亏。本试验轻度调亏模式下, IWUE 比正常灌溉高 40%,产量较正常灌溉提高 5%,灌水 $2\ 475\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 最合适。

参考文献 Reference:

- [1] 张振华,蔡焕杰,杨润亚,等. 沙漠绿洲灌区膜下滴灌作物需水量及作物系数研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(5): 97-100.
ZHANG ZH H, CAI H J, YANG R Y, *et al.* Water requirements and crop coefficients of drip-irrigated crop under mulch in Minqin county oasis[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004, 20(5): 97-100 (in Chinese with English abstract).
- [2] 马富裕,李蒙春,杨建荣,等. 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[J]. 中国农业科学, 2002, 35(12): 1467-1472.
MA F Y, LI M CH, YANG J R, *et al.* A Study of effect of water deficit of three period during cotton anthesis on canopy apparent photosynthesis and WUE[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(12): 1467-1472 (in Chinese with English abstract).
- [3] 宁松瑞,左 强,石建初,等. 新疆典型膜下滴灌棉花种植模
- 式的用水效率与效益[J]. 农业工程学报, 2013, 29(22): 90-99.
NING S R, ZOU Q, SHI J CH, *et al.* Water use efficiency and benefit for typical planting models of drip-irrigated cotton under film in Xinjiang[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(22): 90-99 (in Chinese with English abstract).
- [4] 董国锋,成自勇,张自和,等. 调亏灌溉对苜蓿水分利用效率和品质的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(5): 201-203.
DONG G F, CH Z Y, ZH Z H, *et al.* Effects of regulated deficit irrigation on water use efficiency and quality of alfalfa[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(5): 201-203 (in Chinese with English abstract).
- [5] 薛丽华,张英华,段俊杰,等. 调亏灌溉下冬小麦根系分布与耗水的关系[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(4): 693-697.
XUE L H, ZHANG Y H, DUAN J J, *et al.* Relationship between root distribution and water consumption of winter wheat under regulated deficit Irrigation [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2010, 30(4): 693-697 (in Chinese with English abstract).
- [6] 张喜英. 提高农田水分利用效率的调控机制[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(1): 80-87.
ZHANG X Y. Regulating mechanisms for improving farmland water use efficiency[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(1): 80-87 (in Chinese with English abstract).
- [7] 罗宏海,张亚黎,张旺锋,等. 新疆滴灌棉花花铃期干旱复水对叶片光合特性及产量的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(1): 171-174.
LUO H H, ZHANG Y L, ZHANG W F, *et al.* Effects of rewatering after drought stress on photosynthesis and yield during flowering and boll-setting stage of cotton under mulch-drip irrigation in Xinjiang[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(1): 171-174 (in Chinese with English abstract).
- [8] 牟筱玲,鲍 喙. 土壤水分胁迫对棉花叶片水分状况及光合作用的影响[J]. 中国棉花, 2003, 30(9): 9-10.
MOU X L, BAO X. Effects of soil water stress on water status and photosynthesis of cotton leaves[J]. *China Cotton*, 2003, 30(9): 9-10 (in Chinese).
- [9] 张立桢,曹卫星,张思平,等. 棉花干物质分配和产量形成的动态模拟[J]. 中国农业科学, 2004, 37(11): 1621-1627.
ZHANG L ZH, CAO W X, ZHANG S P, *et al.* Dynamic simulation on dry matter partitioning and yield formation in cotton[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(11): 1621-1627 (in Chinese with English abstract).
- [10] 杨传杰,罗 毅,孙 林,等. 水分胁迫对覆膜滴灌棉花根系活力和叶片生理的影响[J]. 干旱区研究, 2012, 29(5): 802-810.
YANG CH J, LUO Y, SUN L, *et al.* Effect of water stress on root vigor and leaf physiology of cotton under mulch

- drip irrigation[J]. *Arid Zone Research*, 2012, 29(5): 802-810(in Chinese with English abstract).
- [11] 赵威, 李亚鸽, 王艳杰. 植物补偿性光合作用的发生模式及生理机制分析[J]. *植物生理学报*, 2016, 52(12): 1811-1818.
ZHAO W, LI Y G, WANG Y J. The occurrence patterns and physiological mechanism analysis of plant compensatory photosynthesis[J]. *Plant Physiology Journal*, 2016, 52(12): 1811-1818(in Chinese with English abstract).
- [12] 赵成义, 方怡向, 盛钰, 等. 新疆棉花叶片光合与蒸腾特性对膜下滴灌的响应[J]. *灌溉排水学报*, 2009, 28(6): 55-58.
ZHAO CH Y, FANG Y X, SHENG Y, *et al.* Response characteristics of the cotton photosynthesis and transpiration to mulched drip irrigation in Xinjiang[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2009, 28(6): 55-58(in Chinese with English abstract).
- [13] 张向娟, 张亚黎, 张天宇, 等. 棉花长期干旱后复水叶片光合特性及碳氮含量的变化[J]. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2014, 32(2): 138-142.
ZHANG X J, ZHANG Y L, ZHANG T Y, *et al.* Change of rewatering after Long-term drought stress on photosynthesis and content of carbon and nitrogen of cotton[J]. *Journal of Shihezi University(Natural Science Edition)*, 2014, 32(2): 138-142(in Chinese with English abstract).
- [14] 燕鹏, 崔红艳, 方子森, 等. 补充灌溉对土壤水分和胡麻籽粒产量的影响[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(1): 328-333, 341.
YAN P, CUI H Y, FANG Z S, *et al.* Effects of supplemental irrigation on soil moisture and grain yield of *Linum usitatissimum* Linn[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(1): 328-333, 341(in Chinese with English abstract).
- [15] 孟兆江, 段爱旺, 王晓森, 等. 调亏灌溉对棉花根冠生长关系的影响[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(4): 99-104.
MENG ZH J, DUAN A W, WANG X S, *et al.* Effect of regulated deficit irrigation on growth relation of root and shoot in cotton[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(4): 99-104(in Chinese with English abstract).
- [16] 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与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, CH 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 Agronomica Sinica*, 2008, 34(4): 675-683(in Chinese with English abstract).
- [17] 吴甘霖, 段仁燕, 王志高, 等. 干旱和复水对草莓叶片叶绿素荧光特性的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(14): 3941-3946.
WU G L, DUAN R Y, WANG ZH G, *et al.* Effects of drought stress and rehydration on chlorophyll fluorescence characteristics in *Fragaria* × *ananassa* Duch[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(14): 3941-3946(in Chinese with English abstract).
- [18] LI P, FANG G, TI D, *et al.* Effect of soil drought stress on leaf water status, membrane permeability and enzymatic antioxidant system of maize[J]. *Pedosphere*, 2006, 16(3): 326-332.
- [19] 吴凤全, 王亮, 林涛, 等. 干旱胁迫对新疆膜下滴灌棉田光合产物累积的影响[J]. *西北农业学报*, 2016, 25(11): 1636-1642.
WU F Q, WANG L, LIN T, *et al.* Effect of plastic film on evapotranspiration and evaporation of cottons under drip irrigation in Southern Xinjiang[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2016, 25(11): 1636-1642(in Chinese with English abstract).
- [20] 史文娟, 康绍忠, 宋孝玉. 棉花调亏灌溉的生理基础研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2004, 22(3): 91-95.
SHI W J, KANG SH ZH, SONG X Y. Physiology of growth control of cotton under regulated deficit irrigation[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2004, 22(3): 91-95(in Chinese with English abstract).
- [21] 吉恒莹, 马兴旺, 杨涛, 等. 干旱区灌溉量对长绒棉蕾铃脱落的影响[J]. *新疆农业科学*, 2005, 42(5): 298-301.
JI H Y, MA X W, YANG T, *et al.* Effect of irrigation quantity in arid region on abscission of cotton buds and bolls of long-fibre cotton[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2005, 42(5): 298-301.

Effect of Soil Water Content on Photosynthetic and Yield of Drip Irrigation in Cotton under Regulated Deficit Irrigation

FAN Zhichao¹, ZHANG Jusong¹, SHI Junyi², TIAN Liwen²,
LIN Tao² and GUO Rensong²

(1. Xinjiang Agricultural University, Research Center of Cotton Engineering, Urumqi 830052, China;

2. Institute of Economic Crops, Xinjiang Academy of Agricultural Science, Urumqi 830091, China)

Abstract In order to provide theoretical basis for water-saving irrigation and high-yield cultivation of cotton in Xinjiang, normal irrigation(CK) was taken as control under natural ecological conditions. we used the technology of drip irrigation pipes under plastic film, and set up three treatments of 75%, 50%, 25% of the normal irrigation amount to study regulation and compensation effects of regulated deficit irrigation on cotton photosynthetic production. The results showed that regulated deficit irrigation changed the vertical distribution characteristics of soil water, the budding stage of severe deficit was in favor of cotton shoots and root dry matter allocation. The compensation effect of irrigation was affected by both degree of regulated deficit and the growth period. At the budding stage, flowering and boll opening stages, it showed sensitive to water was significantly low at boll stage. Severe water deficit significantly reduced the net photosynthetic rate(P_n), maximal photochemical efficiency(F_v/F_m) in cotton leaves after irrigation, which it could not be restored to the control level. Thus, the analysis indicated that the budding stage could moderate the deficit; The photosynthetic compensation effect was higher in the flowering stage due to the peak of cotton photosynthesis. On the basis of adjustment of deficit, it should not be adjusted loss treatment; due to the decrease of photosynthetic compensation effect at boll opening stage, regulated deficit treatment was beneficial to shorten growth period of cotton, which can be slightly adjusted loss; due to the high compensation effect of irrigation at boll stage, it led cotton late maturing, so the actual situation should be considered, suitable measures for regulating deficit severely should be taken.

Key words Cotton; Soil water content; Net photosynthetic rate; Lint yield

Received 2017-02-10

Returned 2017-05-04

Foundation item National Science and Technology Support Program of “12th 5-year-plan” (No. 2014BAD11B02); the Key Sci-tech Project of “12th Five-year-plan” of Xinjiang(No. 201231102).

First author FAN Zhichao, male, master student. Research area: cotton physiological ecology. E-mail: 285686664@qq.com

Corresponding author ZHANG Jusong, male, professor. Research area: high yield cultivation. E-mail: xjndzjs@163.com

(责任编辑: 成敏 Responsible editor: CHENG Min)