

氮肥对非充分灌溉下棉花产量及品质的补偿作用

石洪亮, 张巨松*, 严青青, 李春艳, 李健伟
(新疆农业大学农学院/教育部棉花工程研究中心, 乌鲁木齐 830052)

摘要: 【目的】水分不能按照棉花正常需水量进行灌溉, 对棉花生长发育、产量及品质会造成一定影响, 本文旨在通过研究氮肥施用量来缩小因灌溉水不足对棉花所造成的影响, 以期干旱地区棉花水肥高效利用提供理论依据。【方法】试验以棉花‘新陆中 54 号’为材料, 采用裂区试验设计, 主区为总灌溉量, 分别为 2800 m³/hm² (非充分灌溉)、3800 m³/hm² (常规灌溉), 副区为 4 个施氮 (N) 水平, 即 0 kg/hm² (N0)、150 kg/hm² (N150)、300 kg/hm² (N300)、450 kg/hm² (N450)。测定了棉花的生长、棉绒品质和棉花的肥水利用率。【结果】同一氮肥处理下, 非充分灌溉处理干物质与氮素最大积累速率出现时间及拐点时间均较常规灌溉处理提前, 干物质与氮素最大积累量及积累速率、干物质与氮素向生殖器官分配比例、氮素向生殖器官的转移率、籽棉产量及品质均低于常规灌溉处理, 但籽棉增产率、氮肥农学利用率及水、氮利用率均高于常规灌溉处理。同一灌溉量下, 随着施氮量的增加, 干物质与氮素最大积累速率出现时间、拐点时间表现为 N450 > N300 > N150 > N0, 干物质与氮素积累量及积累速率、最大生长特征值、干物质与氮素向生殖器官分配比例及转移率、籽棉产量及品质、水分利用率均表现为 N300 > N450 > N150 > N0, 籽棉增产率、氮肥农学利用效率及氮肥利用率表现为 N300 > N450 > N150。非充分灌溉下增施氮肥的补偿效果随着氮肥用量的增加呈先增加后下降的趋势, N300 处理补偿效果最为显著, 与常规灌溉处理相比, 补偿效应主要表现在干物质与氮素最大积累速率提高了 1.9%、3.1%, 干物质向生殖器官分配比例及氮素转移率提高了 24.0%、5.1%, 水、氮利用率提高了 6.1%~8.8%、17.3%~17.9%, 籽棉增产率提高了 6.1%~8.8%, 纤维长度、整齐度及比强度提高了 4.3%~20.1%、5.7%~7.3% 及 2.2%~12.5%。氮肥对棉花生长发育的影响大于水分。【结论】非充分灌溉下, 施 N 300 kg/hm² 棉花可正常生长, 干物质与氮素积累量适宜, 向生殖器官分配比例及转移率较高, 水、氮利用率最高, 且节水 26.3%。棉花虽然在产量与品质上有所下降, 籽棉产量较常规灌溉几乎没有下降。从干旱地区农业缺水的现实考虑, 在南疆采用非充分灌溉下, 施氮 300 kg/hm² 可补偿缺水对棉花产量和品质的影响。

关键词: 棉花; 非充分灌溉; 氮肥; 水分利用率; 氮肥利用率; 纤维品质

Compensation effects of nitrogen fertilizer on yield and quality of cotton under insufficient irrigation

SHI Hong-liang, ZHANG Ju-song*, YAN Qing-qing, LI Chun-yan, LI Jian-wei
(Agriculture College, Xinjiang Agricultural University/Research Center of Cotton Engineering,
MOE, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

Abstract: 【Objectives】Insufficient irrigation might cause adverse effect on cotton growth, yield and quality. This paper studied the suitable nitrogen fertilizer rate to alleviate the adverse impact of insufficient irrigation. 【Methods】Using cotton cultivar of ‘Xin Lu Zhong No.54’ as tested material, a split plot experiment was conducted. The main factor was total irrigation amount of 2800 m³/hm² (insufficient irrigation) and 3800 m³/hm² (sufficient irrigation); the deputy area was nitrogen levels of 0, 150, 300 and 450 kg/hm². The cotton growth and lint quality were determined, and water use efficiency was calculated at harvest stage. 【Results】Under the same treatment levels of nitrogen, the maximum accumulation rate of dry matter and nitrogen and the inflexion point in insufficient irrigation arrived earlier than those in conventional irrigation; the dry matter and nitrogen

收稿日期: 2017-03-20 接受日期: 2017-06-29

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目“棉花高产高效关键技术研究及示范”课题(2014BAD11B02)资助。

联系方式: 石洪亮 E-mail: xjndshl@163.com; * 通信作者 张巨松 E-mail: xjndzjs@163.com

accumulation amount and the maximum accumulation rate, the allocation ratio of dry matter and nitrogen in reproductive organ, the transfer efficiency of nitrogen to reproductive organ, the seed cotton yield and quality were lower; but the seed cotton yield increase rate, the nitrogen agronomic use efficiency, the water and nitrogen use efficiency were higher. Under both the irrigation treatments, with the increase of nitrogen fertilizer rate, the maximum accumulation rate and the inflexion point of dry matter and nitrogen arrived the earliest in N450, followed by N300, N150, N0 in turn; the dry matter and maximum N accumulation amount and accumulation rate, the maximum growth characteristic value, the allocation ratio of dry matter and nitrogen to the reproductive organ, the transfer efficiency of nitrogen to reproductive organ, the seed cotton yield and quality and water use efficiency were in order of N300 > N450 > N150 > N0; the seed cotton yield increase rate, the nitrogen agronomic use efficiency and nitrogen use efficiency were in order of N300 > N450 > N150. The compensation effect of N fertilizer showed the trend of firstly increase and then decrease with the increase of the nitrogen rate under insufficient irrigation, the compensation effect of N300 treatment was the most significant. Compared with sufficient irrigation treatment, the compensation effect mainly showed that the maximum accumulation rates of dry matter and nitrogen were increased by 1.9% and 3.1%, the allocation ratio of dry matter to the reproductive organ and the transfer efficiency of nitrogen to reproductive organ were raised by 24.0% and 5.1%, water and nitrogen use efficiencies were enhanced by 6.1%–8.8% and 17.3%–17.9%, the seed cotton yield increase rate was increased by 6.1%–8.8%, the fiber length, the fiber uniformity and fiber strength were increased by 4.3%–20.1% and 5.7%–7.3% and 2.2%–12.5%, respectively. The effect of nitrogen fertilizer on cotton growth was greater than that of water. 【Conclusions】 At N rate of 300 kg/hm², there is no significance difference in the cotton yield and fiber quality between the insufficient irrigation and sufficient irrigation. With this N rate under insufficient irrigation condition, cotton plants can keep normal growth, the dry matter and N accumulation are suitable, and their distribution rates are high, so the water and nitrogen use efficiencies are high. Considering the water shortage in the south of Xinjiang, applying nitrogen of 300 kg/hm² could compensate the adverse impact of insufficient irrigation and increase cotton fiber quality, water and nitrogen use efficiency is the highest, and cotton fiber quality is increased, water and nitrogen use efficiency is the highest, and water saving is 26.3%.

Key words: cotton; insufficient irrigation; nitrogen fertilizer; water use efficiency; nitrogen use efficiency; fiber quality

非充分灌溉是针对水资源的紧缺与用水效率低下下的普遍性问题而提出的, 粮食和经济作物生产中先后出现了非充分灌溉, 又称为有限灌溉或亏缺灌溉, 不追求单位面积的最高产量, 允许一定限度的减产。

新疆棉区光热资源充足, 但作物生长季节降雨少, 对灌溉水的需求非常大, 水资源紧缺已成为新疆制约作物产量和农业发展的重要因素^[1]。膜下滴灌技术早已服务于棉花、番茄等作物, 不仅可以对田间土壤进行精量的水分控制, 还能有效减少地表径流、棵间蒸发和深层渗漏^[2-3]。

水分亏缺是作物生长环境中普遍存在的一种逆境胁迫, 也是影响干旱半干旱地区作物生产的主要因素, 水分和养分具有强烈的交互作用, 旱地农业中植物营养的基本问题在于如何在水分受限制的条件下合理使用肥料, 达到“以肥调水、以水促肥”

的目的, 提高作物的水分利用效率, 增强抗旱性, 促进作物对有限水资源的充分利用^[4-7]。但并不是每种作物、每个生育期、任何程度的水分亏缺都会对作物造成伤害和减产, 作物在生理生化代谢和生长发育等方面具有一定的调节作用^[8-9]。作物在干旱后增施氮肥可以产生补偿效应, 通过施肥来补充土壤营养物质不仅能解除水分胁迫因子的影响, 而且通过调节作物的生理过程, 有效地提高作物产量和水分利用效率, 补偿因水分不足而造成的损失^[10]。研究结果显示, 水分亏缺抑制了作物的生长、产量和氮素吸收利用能力, 氮素营养可增强作物抗干旱的能力, 且能够通过适量供氮减轻水分亏缺对作物生长发育的影响, 促进作物在干旱条件下的生长; 同时水分亏缺会减少叶片对氮素的吸收, 降低氮素向生殖器官的转运^[11-13]。但施氮过量会推迟作物干物质积累起始时间和最大积累速率出现时间, 不利于作物

光合产物特征参数的协调,进而影响产量^[14]。吴自明等^[15]研究表明,适量增施氮肥是降低水分亏缺危害、增强叶片光合功能、延长叶片功能期、防御早衰的有效措施。氮素显著影响纤维品质,适宜施氮可以改善棉纤维品质,优化氮肥管理措施能够显著提高纤维长度和比强度^[16-19]。

前人对紫花苜蓿^[4]、小麦^[5-6, 11]、水稻^[7, 15, 20]、油菜^[13]及果树^[12]水分亏缺灌溉下的氮肥效应研究已较多,目前在棉花上的主要研究方向为调亏灌溉^[21-22]和干旱后复水^[9, 23-24],在全生育期非充分灌溉下增施氮肥对棉花产量形成的补偿效应还未见报道。本试验研究在非充分灌溉下增施氮肥对棉花产量及氮肥利用率的影响,以期揭示氮肥对棉花产量的补偿效应,为干旱地区棉花水肥高效管理技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2015、2016 年的 4—10 月份在新疆农业科学院经济作物研究所实验基地进行,该基地位于新疆阿克苏市阿瓦提县丰收二场一连,地处北纬 39°31′~40°50′、东经 79°45′~81°5′之间,属暖温带大陆性干旱气候,无霜期 183~227 d,年均日照 2750~3029 h,全年 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 3802.9℃,多年平均降水量 46.7 mm,多年平均蒸发量 1890.7 mm,土壤类型为灰漠土,土壤平均容重 1.44 g/cm³,播种前土壤质量含水率(0—60 cm)平均为 16.24%。连续 2 年土壤基础理化性质见表 1。

1.2 试验设计

采用裂区试验设计,主区为总灌溉量,分别为非充分灌溉 2800 m³/hm² (当地一般棉田平均水平)和常规灌溉 3800 m³/hm² (棉花正常生长灌溉水平);副区为 4 个施氮(N)水平,即 0、150、300、450 kg/hm²,

分别以 N0、N150、N300、N450 表示。供试棉花品种为当地大面积推广种植的新陆中 54 号。采用机采棉种植模式,行距配置 (66 + 10)cm,膜间行距 60 cm,株距 11 cm,理论株数为 24.25 万株/hm²。小区面积 44.85 m²,重复 3 次,重复间距 50 cm,占地面积为 1159.2 m²。

根据本研究团队前期研究成果,基肥追肥比例为 2 : 8 可使棉花对养分吸收达到最佳水平,棉花蕾期不灌溉对棉花的影响是不可修复的,对产量的形成有巨大的影响;同时,总结前人研究结果,棉花花铃期需水需肥量为总量的 70%,灌溉 10 次及每 7 d 灌溉一次对棉花生长发育及产量的形成有最佳的调控效应。因此,本试验共滴灌 10 次,自现蕾(6 月 16—20 日)开始滴灌,一个灌溉周期为 7 d,每次滴灌量由水表控制,施氮量经电子秤称量后,对应各处理放入施氮罐中,随水滴施,按照 1 水 1 肥进行。施用的肥料为尿素、颗粒状过磷酸钙 (P₂O₅ 12%) 和农用颗粒钾肥 (K₂O 40%)。基肥:尿素施用总量的 20%,颗粒状过磷酸钙 200 kg/hm²,农用颗粒钾肥 100 kg/hm²。追肥:全部施用尿素 (总量的 80%),如表 2 所示。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤基础理化性质 2015—2016 年播种前按五点对角线方法取 0—20、20—40、40—60 cm 土层土样,测定土壤全氮、速效氮、速效磷、速效钾及有机质含量。

1.3.2 植株地上部干物质及全氮含量 于棉花现蕾期、盛蕾期、初花期、盛花期、盛铃期和吐絮期取样,选取具有代表性的 6 株棉花,按叶、茎、蕾、铃壳和棉纤维等不同器官分开,105℃ 杀青 30 min,然后于 80℃ 恒温烘至恒重,测定其干物质量。烘干的棉株样品经粉碎,过 0.5 mm 筛,备用。采用奈氏

表 1 土壤基础理化性质
Table 1 The basic physico-chemical properties of soil

年份 Year	土层深度 (cm) Soil depth	全氮 (g/kg) Total N	有机质 (g/kg) Organic matter	水解性氮 (mg/kg) Available N	有效磷 (mg/kg) Available P	速效钾 (mg/kg) Available K
2015	0—20	0.50	6.9	105.0	32.4	131
	20—40	0.40	5.6	70.8	21.6	168
	40—60	0.20	2.2	45.0	2.6	240
2016	0—20	0.62	8.0	32.6	24.8	111
	20—40	0.44	3.0	23.2	6.0	126
	40—60	0.34	2.0	13.8	1.8	152

表 2 各处理每次灌溉水量和施氮量
Table 2 Irrigation and nitrogen amount in the listed irrigation cycle in the treatments

处理 Treatment	日期 Date (d/m)										
	10/4—12/4	16/6—20/6	23/6—27/6	30/6—4/7	7/7—11/7	14/7—18/7	21/7—25/7	28/7—1/8	4/8—8/8	11/8—15/8	18/8—22/8
灌水量 Irrigation amount (m ³ /hm ²)											
非充分灌溉 Insufficient irrigation		168	224	280	336	392	392	336	280	224	168
常规灌溉 Sufficient irrigation		228	304	380	456	532	532	456	380	304	228
施氮量 N amount (kg/hm ²)											
N0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N150	30	7.2	9.6	12	14.4	16.8	16.8	14.4	12	9.6	7.2
N300	60	14.4	19.2	24	28.8	33.6	33.6	28.8	24	19.2	14.4
N450	90	21.6	28.8	36	43.2	50.4	50.4	43.2	36	28.8	21.6

比色法测定棉株不同部位的全氮含量。

地上部棉株干物质与氮积累量的增长符合 Logistic 曲线, 其基本模型为 $y = k/[1 + e^{(a + bt)}]$ 。式中: y 为棉株干物质或氮积累量; k 为理论的最大值; t 为出苗后的天数; a 、 b 为待定系数。分别对方程求导数, 可得相应 Logistic 曲线生长特征值: 进入快速增长期时间拐点 $t_1 = (a - 1.317)/b$; 结束快速增长期时间拐点 $t_2 = (a + 1.317)/b$; 最大生长速率 $V_m = -bk/4$; 最大生长速率出现时间 $t_0 = -a/b$; 快速增长持续时间 $\Delta t = t_2 - t_1$; 快速增长期特征值 $GT = -bk\Delta t/4$, 为干物质与氮积累量已达到最大积累量的 65% 以上。

1.3.3 产量及纤维品质 2015—2016 年在棉花吐絮期, 记录每小区株数和铃数, 选取有代表性的棉株, 从上至下取棉花样品 100 朵, 测其铃重, 将采集的棉花纤维样品, 送往新疆农业科学院棉花纤维检测中心检测, 重复 3 次。

1.3.4 计算公式 水分利用率 (kg/m³) = 籽棉产量/总灌溉量;

氮肥农学利用率 (kg/kg) = (施氮区产量 - 不施氮区产量)/施氮量;

氮肥利用率 (%) = (施氮区植株总吸氮量 - 不施氮区植株总吸氮量)/施氮量 $\times 100$;

氮素转运率 (%) = (盛铃期前营养体氮素积累量 - 吐絮期营养体氮素积累量)/盛铃期前营养体氮素积累量 $\times 100$ 。

1.4 统计分析

采用 Excel 2013、SPSS 19.0 进行统计分析, 采用 General Linear Model-Univariate Proce-Dure 进行两因素方差分析, 采用 Duncan 新复极差法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 非充分灌溉下增施氮肥对棉花地上部干物质积累量的影响

非充分灌溉下增施氮肥对棉花地上部干物质的动态累积模型参数见表 3。非充分灌溉下干物质积累的最大生长速率出现时间、进入快速增长期的时间、结束快速增长期时间及快速增长持续时间较常规灌溉分别平均提前了 5 d、2 d、6 d 及 4 d。非充分灌溉与常规灌溉下各氮肥处理干物质积累最大生长速率出现时间、进入快速增长期的时间、结束快速增长期时间及快速增长持续时间由早到晚顺序为 N0、N150、N300、N450; 最大积累速率与快速增长期生长特征值 (GT) 均表现为 N300 > N450 > N150 > N0。非充分灌溉下 N150、N300、N450 处理干物质积累量较 N0 处理分别增加了 11.7%、37.1%、38.6%, 最大积累速率较 N0 处理分别提高了 6.9%、30.4%、28.7%, GT 较 N0 处理增加了 12.4%、44.6%、42.1%; 常规灌溉下 N150、N300、N450 处理干物质积累量较 N0 处理分别增加了 11.6%、36.9%、38.9%, 最大积累速率较 N0 处理提高了 8.1%、29.8%、18.7%, GT 较 N0 处理增加了 10.5%、36.2%、31.9%; 且非充分灌溉下 N300 处理补偿效应较常规灌溉下 N300 处理干物质积累量、最大积累速率及 GT 分别提高了 0.4%、1.9% 及 18.8%。

表 3 不同处理棉花地上部干物质积累 Logistic 模型及其特征值

Table 3 Coefficients of the logistic models for aboveground dry matter accumulation of cotton under different treatments

灌溉量 (m ³ /hm ²) Irrigation	氮水平 N level	t ₀	t ₁	t ₂	Δt	V _m [g/(plant·d)]	GT	R ²
		(d)						
2800	N0	57 d	44 d	72 e	29 d	1.17 b	31 c	0.9979 **
	N150	67 c	52 c	83 cd	31 c	1.26 b	35 bc	0.9985 **
	N300	78 ab	61 ab	96 ab	36 b	1.68 a	55 a	0.9936 **
	N450	79 ab	63 a	97 ab	34 b	1.64 a	53 a	0.9952 **
3800	N0	62 cd	45 d	79 de	34 b	1.20 b	37 bc	0.9971 **
	N150	73 b	57 bc	91 bc	34 b	1.31 b	41 b	0.9978 **
	N300	81 a	64 a	100 ab	36 b	1.71 a	58 a	0.9935 **
	N450	82 a	63 a	103 a	40 a	1.48 ab	54 a	0.9951 **

注 (Note): $y=k/[1+e^{(a+bt)}]$. y —棉花干物质积累量 The cotton dry matter accumulation; t —棉花出苗后的天数 The days after the emergence of cotton (d); t_0 —最大生长速率出现时间 The days of the maximum accumulation rate occurred; t_1 —进入快速增长期时间拐点 The beginning time of inflection point of rapid accumulation; t_2 —结束快速增长期时间拐点 The end time of inflection point of rapid accumulation; Δt —快速增长持续时间 The continuous time of rapid growth; V_m —最大生长速率 The maximum growth rate; GT—快速增长期生长特征值 The eigenvalue of rapid growth; 同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different letters in a column mean significant differences among treatments ($P < 0.05$); **— $P < 0.01$.

2.2 非充分灌溉下增施氮肥对棉花干物质分配的影响

由图 1 可知, 非充分灌溉与常规灌溉下各氮肥处理营养器官和生殖器官干物质积累和分配比例均随生育进程的推移而逐渐增加, 初花期前营养生长速度快, 初花期后生殖器官生长逐步加大。同一氮肥处理下, 非充分灌溉较常规灌溉下各氮肥处理营养器官和生殖器官积累分别平均降低了 4.1%、9.4%。同一灌溉量下, 随着氮肥施用量的增加, 营养器官干物质积累量呈增加趋势, 表现为 $N450 > N300 > N150 > N0$; 生殖器官干物质积累量呈先升后降的趋势, 表现为 $N300 > N450 > N150 > N0$ 。非充分灌溉与常规灌溉下均以 N300 处理利于营养生长及时向生殖生长转运, 转运率分别为 30.7% 和 31.8%, 且非充分灌溉下 N300 处理补偿生殖器官干物质分配比例补偿效应较常规灌溉下 N300 处理提高了 24.0% (表 4)。

2.3 非充分灌溉下增施氮肥对棉花地上部氮素积累量的影响

非充分灌溉下增施氮肥对棉花地上部氮素的动态累积模型参数见表 5。非充分灌溉下氮素积累的最大生长速率出现时间、进入快速增长期的时间、结束快速增长期时间及快速增长持续时间较常规灌溉分别平均提前了 4 d、3 d、5 d 及 2 d。非充分灌溉与常规灌溉下各氮肥处理氮素积累最大生长速率出现

时间、进入快速增长期的时间、结束快速增长期时间及快速增长持续时间均表现为 $N450 > N300 > N150 > N0$; 最大积累速率与快速增长期生长特征值 (GT) 均表现为 $N300 > N450 > N150 > N0$ 。非充分灌溉下 N150、N300、N450 处理棉花最大积累速率较 N0 处理分别提高了 15.2%、27.3%、26.9%, GT 较 N0 处理增加了 31.8%、56.5%、53.0%; 常规灌溉下 N150、N300、N450 处理棉花最大积累速率较 N0 处理分别提高了 14.4%、26.4%、21.5%, GT 较 N0 处理增加了 31.9%、56.2%、47.4%; 且非充分灌溉下 N300 处理补偿效应较常规灌溉下 N300 处理最大积累速率和 GT 分别提高了 3.1%、0.4%。

2.4 非充分灌溉下增施氮肥对棉花地上部氮素积累与分配的影响

由表 6 可知, 非充分灌溉与常规灌溉下各氮肥处理在不同生育时期均存在显著性差异 ($P < 0.05$)。

非充分灌溉下各氮肥处理在盛蕾期至盛花期 (营养生长为主) 营养器官 (茎、叶) 与生殖器官 (蕾、铃壳、纤维) 中氮素平均分配为 53.9%~76.4%、23.6%~46.1%, 较常规灌溉营养器官中氮素分配减少了 3.7%~8.8%, 但在生殖器官中氮素分配增加了 11.2%~12.6%; 2 种灌溉下在营养器官中氮素分配均表现为 $N450 > N300 > N150 > N0$, 在生殖器官中氮素分配表现为 $N0 > N150 > N300 > N450$ 。

非充分灌溉下各氮肥处理在盛铃期至吐絮期 (生

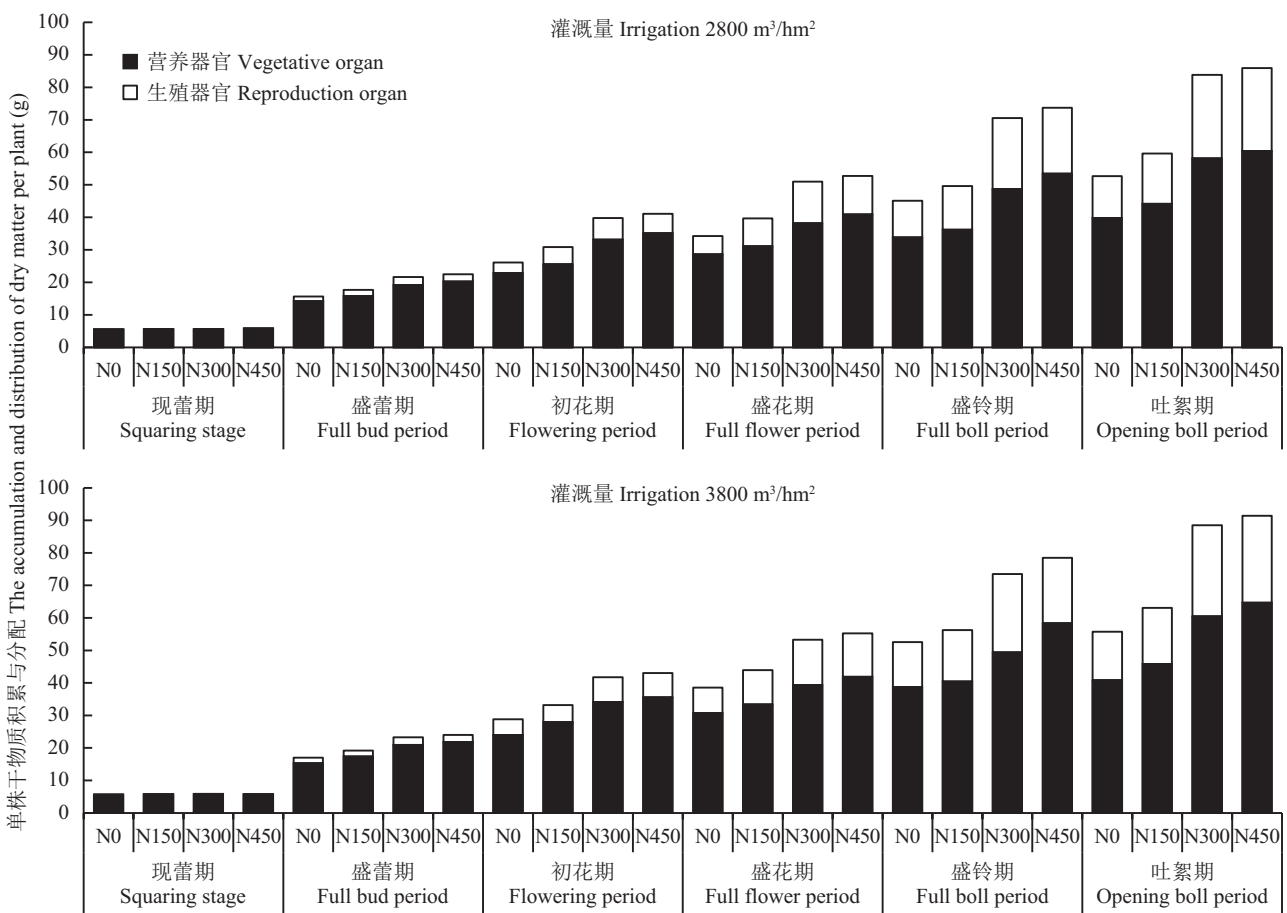


图 1 不同处理棉花地上部干物质在营养器官与生殖器官中的分配量

Fig. 1 Aboveground dry matter distribution in vegetative and reproductive organs of cotton under different treatments

表 4 不同处理吐絮期棉花地上部干物质积累量及其在营养器官与生殖器官中的分配比例

Table 4 Aboveground dry matter accumulation amount and distribution ratio in vegetative and reproductive organs of cotton at boll opening period under different treatments

灌溉量 (m³/hm²) Irrigation	氮水平 N level	积累量 (g/plant) Accumulation	分配 Distribution (%)	
			营养器官 Vegetative	生殖器官 Reproduction
2800	N0	52.7 e	75.4 a	24.6 d
	N150	59.7 cd	73.9 ab	26.1 cd
	N300	83.8 b	69.3 cd	30.7 ab
	N450	85.9 ab	70.3 bcd	29.8 abc
3800	N0	55.8 de	73.0 abc	27.0 bcd
	N150	63.1 c	72.5 abc	27.5 bcd
	N300	88.5 ab	68.2 d	31.8 a
	N450	91.4 a	70.6 bcd	29.4 abc
F 值 F value				
灌溉 Irrigation (I)		7.27 *	1.80	1.72
氮肥 N level (N)		127.85 **	8.83 **	8.89 **
灌溉 × 氮肥 I × N		0.13	0.44	0.47

注 (Note): 同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different letters in a column mean significant differences among treatments ($P < 0.05$). *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$.

表 5 不同处理棉花地上部氮素积累 Logistic 模型及其特征值

Table 5 Logistic models and coefficients for aboveground N accumulation of cotton under different treatments

灌溉量 (m ³ /hm ²) Irrigation	氮水平 N level	t ₀	t ₁	t ₂	Δt	V _m [g/(plant·d)]	GT	R ²
		(d)						
2800	N0	45 e	34 c	59 c	25 e	2.64 d	61 g	0.9760 *
	N150	50 de	35 c	66 bc	31 d	3.11 c	89 e	0.9692 *
	N300	59 bc	40 bc	81 a	42 b	3.63 a	139 b	0.9773 *
	N450	61 ab	43 ab	80 a	37 c	3.61 a	129 c	0.9721 *
3800	N0	48 de	36 c	62 bc	26 e	2.76 d	67 f	0.9822 *
	N150	53 cd	37 bc	70 b	33 d	3.22 bc	98 d	0.9776 *
	N300	64 ab	43 ab	87 a	43 a	3.75 a	153 a	0.9818 *
	N450	67 a	49 a	87 a	38 bc	3.51 ab	127 c	0.9685 *

注 (Note): $y=k/[1+e^{(a+bt)}]$. y —棉花氮积累量 The cotton nitrogen accumulation; t —棉花出苗后的天数 The days after the emergence of cotton(d); t_0 —氮最大积累速率出现时间 The days of the maximum nitrogen accumulation rate occurred; t_1 —进入快速积累期时间拐点 The beginning time of inflection point of rapid accumulation; t_2 —结束快速积累期时间拐点 The end time of inflection point of rapid accumulation; Δt —氮快速积累持续天数 The continued days of rapid nitrogen accumulation; V_m —氮最大积累速率 The maximum accumulation rate of nitrogen; GT—快速增长期生长特征值 The rapid growth eigen value; 同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different letters in a column mean significant differences among treatments ($P < 0.05$); *— $P < 0.05$.

殖生长为主) 营养器官、生殖器官中氮素分配及茎叶转移率平均为 32.0%~42.5%、57.5%~68.0% 及 33.4%~62.5%，较常规灌溉营养器官中氮素分配减少了 6.9%~7.3%，但在生殖器官中氮素分配增加了 3.5%~5.9%；盛铃期茎叶转移率提高了 5.8%，吐絮期茎叶转移率降低了 0.3%；2 种灌溉下在营养器官中氮素分配均表现为 N450 > N300 > N150 > N0，生殖器官中氮素分配表现为 N0 > N150 > N300 > N450，但营养器官茎叶氮素转移率表现为 N300 > N450 > N150 > N0。

至吐絮期，2 种灌溉下 N0、N150 处理棉花生殖器官氮素分配比例大，但总氮素积累量较小，干物质积累量也较小 (表 4)，籽棉产量与 N300、N450 处理存在显著差异 (表 7)，说明 N0、N150 处理存在不同程度的早衰；非充分灌溉较常规灌溉下 N300 处理生殖器官中分配比例仅差 0.4%，但向生殖器官中补偿效应有明显提高，表现在转移率提高了 5.1%。

2.5 非充分灌溉下增施氮肥对棉花产量及水、氮利用率的影响

由表 7 可知，2015 年灌溉对籽棉产量的影响未达到显著性差异，2016 年对籽棉产量的影响达到显著性差异 ($P < 0.05$)；连续 2 年对氮肥利用率的影响达到显著性差异 ($P < 0.05$)；连续 2 年对水分利用率与氮肥农学利用率的影响达到极显著差异 ($P < 0.05$)。氮肥在连续 2 年对籽棉产量、水分利用率、氮肥农

学利用率及氮肥利用率的影响均达到极显著差异 ($P < 0.05$)。灌溉与氮肥的交互作用在连续 2 年对氮肥农学利用率的影响达到显著性差异 ($P < 0.05$)；2016 年对水分利用率的影响达到极显著差异 ($P < 0.05$)，对氮肥利用率达到显著性差异 ($P < 0.05$)。2015 和 2016 年非充分灌溉与常规灌溉下 N300 和 N450 处理间连续 2 年氮肥农学利用率与氮肥利用率存在显著性差异，但这两个处理与 N150 处理间除氮肥农学利用率外各指标大都存在显著性差异；连续 2 年籽棉产量与水分利用率均表现为 N300 > N450 > N150 > N0，氮肥利用率均表现为 N300 > N450 > N150。非充分灌溉下连续 2 年 N150、N300、N450 处理籽棉产量较 N0 处理分别增加了 13.5%~15.0%、28.5%~39.7%、25.2%~36.7%，水分利用率较 N0 处理提高了 13.5%~15.0%、28.5%~39.9%、25.2%~36.7%。常规灌溉下连续 2 年 N150、N300、N450 处理籽棉产量较 N0 处理分别增加了 10.9%~12.7%、26.0%~37.5%、23.1%~33.2%，水分利用率较 N0 处理提高了 10.7%~12.7%、26.0%~37.5%、23.1%~33.2%。2015~2016 年非充分灌溉与常规灌溉下增施氮肥均以 N300 处理提高幅度较大，且非充分灌溉下 N300 处理补偿效应较常规灌溉下 N300 处理籽棉增产率、水分利用率、氮肥农学利用率及氮肥利用率分别提高了 6.1%~8.8%、6.1%~8.8%、4.3%~8.2% 及 17.3%~18.0%。

表 6 不同处理地上部棉花各器官氮素积累与分配

Table 6 Aboveground nitrogen accumulation and distribution in different organs of cotton under different treatments

灌溉 Irrigation (m³/hm²)	氮水平 N level	茎 Stem			叶 Leaf			蕾 Bud		铃壳 Shell		纤维 Fiber		总积累量 Total N (kg/hm²)
		NA (kg/hm²)	NP (%)	TE (%)	NA (kg/hm²)	NP (%)	TE (%)	NA (kg/hm²)	NP (%)	NA (kg/hm²)	NP (%)	NA (kg/hm²)	NP (%)	
盛蕾期 Full bud period														
2800	N0	27.04 h	23.63		53.17 h	46.47		34.21 a	29.90					114.41 g
	N150	28.19 f	24.10		59.73 f	51.08		29.03 c	24.82					116.93 f
	N300	31.54 d	26.60		62.73 d	52.91		24.30 e	20.49					118.56 e
	N450	34.16 c	28.34		63.37 c	52.57		23.02 f	19.09					120.53 c
3800	N0	27.64 g	24.14		56.55 g	49.40		30.30 b	26.46					114.46 g
	N150	28.88 e	24.28		62.10 e	52.23		27.93 d	23.49					118.89 d
	N300	35.36 b	28.63		65.20 b	52.81		22.92 f	18.56					123.46 b
	N450	44.12 a	33.12		70.57 a	52.98		18.53 g	13.90					133.19 a
盛花期 Full flower period														
2800	N0	23.95 h	16.17		36.65 h	24.75				42.19 a	28.48	45.87 a	30.60	148.09 g
	N150	27.21 f	17.75		48.20 f	31.46				37.70 c	24.60	40.12 c	26.19	153.20 f
	N300	37.29 d	20.63		72.85 d	40.30				32.93 e	18.21	37.72 d	20.86	188.13 b
	N450	38.80 c	20.62		83.05 b	44.14				30.46 f	16.19	35.86 f	19.06	188.11 b
3800	N0	26.78 g	17.09		42.91 g	27.39				41.10 b	26.23	45.33 b	29.28	156.63 e
	N150	31.20 e	19.74		54.83 e	34.70				34.81 d	22.03	37.18 e	23.53	157.99 d
	N300	44.09 b	23.43		80.74 c	42.92				28.36 g	15.07	34.94 g	18.57	192.22 a
	N450	50.47 a	26.25		86.47 a	44.98				24.24 h	12.61	31.07 h	16.16	180.76 c
盛铃期 Full boll period														
2800	N0	20.26 h	13.98	15.41	26.35 h	18.19	28.11			45.47 c	31.39	52.78 e	36.44	144.84 h
	N150	23.65 f	15.19	13.07	35.81 f	23.00	25.71			45.55 c	29.26	50.66 g	32.55	155.65 f
	N300	33.64 d	16.72	9.81	59.82 d	29.74	17.89			50.56 a	25.14	57.13 b	28.40	201.11 c
	N450	35.71 c	17.90	7.97	70.19 b	35.18	15.49			42.81 e	21.46	50.80 f	25.46	199.47 d
3800	N0	22.72 g	14.83	15.18	31.26 g	20.42	27.16			44.96 d	29.36	54.17 d	35.39	153.08 g
	N150	26.67 e	15.55	14.51	42.18 e	24.59	23.08			47.29 b	27.57	55.39 c	32.29	171.49 e
	N300	39.96 b	18.52	9.37	66.95 c	31.03	17.08			50.45 a	23.38	58.43 a	27.08	215.76 a
	N450	47.19 a	22.49	6.49	75.42 a	35.94	12.79			40.10 f	19.11	47.13 h	22.46	209.81 b
吐絮期 Opening boll period														
2800	N0	19.09 h	12.52	20.31	25.27 h	16.57	31.07			51.06 h	33.48	57.07 h	37.43	152.45 h
	N150	22.36 f	13.59	17.81	26.28 g	15.97	45.49			53.20 f	32.34	62.68 e	38.10	164.49 f
	N300	31.42 d	15.57	15.77	33.92 d	16.81	53.45			62.41 b	30.93	74.04 b	36.69	201.75 c
	N450	32.80 c	16.49	15.47	40.94 b	20.58	50.71			56.40 c	28.36	68.74 c	34.57	198.85 d
3800	N0	21.23 g	13.05	20.74	28.71 f	17.65	33.11			52.21 g	32.11	60.48 g	37.19	162.6 g
	N150	25.06 e	14.23	19.70	29.16 e	16.56	46.83			55.03 e	31.25	66.85 d	37.97	176.06 e
	N300	36.65 b	16.51	16.86	34.64 c	15.60	57.11			70.45 a	31.73	80.32 a	36.17	222.03 a
	N450	44.30 a	21.02	12.23	48.31 a	22.92	44.14			55.64 d	26.40	62.51 f	29.66	210.73 b

注 (Note): NA—氮素积累量 Nitrogen accumulation amount; NP—占总积累量比例 Percentage to the total; TE—转移率 Transfer rate; 同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different letters in a column mean significant differences among treatments ($P < 0.05$).

表 7 不同处理棉花籽棉产量、氮肥农学利用率及水、氮利用率

Table 7 Seed cotton yield and efficiency of nitrogen and water use of cotton under different treatments

灌溉 (m ³ /hm ²) Irrigation	氮处理 N treatment	2015				2016			
		Y (kg/hm ²)	WUE (kg/m ³)	NAUE (kg/kg)	NUE (%)	Y (kg/hm ²)	WUE (kg/m ³)	NAUE (kg/kg)	NUE (%)
2800	N0	4147.4 c	1.48 c			3808.4 d	1.36 c		
	N150	4796.1 b	1.71 b	4.3 abc	17.2 d	4479.2 c	1.60 b	4.5 b	17.1 c
	N300	5797.5 a	2.07 a	5.5 a	32.9 a	6337.9 a	2.26 a	8.4 a	37.4 a
	N450	5543.3 a	1.98 a	3.1 bc	21.6 c	6018.3 b	2.15 a	4.9 b	29.4 b
3800	N0	4321.1 c	1.14 d			4041.9 d	1.06 e		
	N150	4847.5 b	1.28 d	3.5 abc	11.0 e	4629.6 c	1.22 d	3.9 b	13.5 d
	N300	5836.8 a	1.54 c	5.1 ab	27.1 b	6464.2 a	1.70 b	8.1 a	30.7 b
	N450	5618.3 a	1.48 c	2.9 c	21.4 c	6053.6 b	1.59 b	4.5 b	18.0 c
F 值 F value									
灌溉 Irrigation (I)		0.62	172.8**	33.22**	10.76*	5.04*	252.3**	43.48**	70.77*
氮肥 N level (N)		645**	42.63**	565.9**	776.8**	1377**	169.0**	1382**	1694**
灌溉 × 氮肥 I × N		0.08	1.47	3.65*	0.09	0.45	5.44**	5.74*	308.7*

注 (Note): Y—籽棉产量 Seed cotton yield; WUE—水分利用率 Water use efficiency; NAUE—氮肥农学利用率 Nitrogen agronomic use efficiency; NUE—氮肥利用率 Nitrogen use efficiency; 同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different letters in a column mean significant differences among treatments ($P < 0.05$). *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$.

2.6 非充分灌溉下增施氮肥对棉花纤维品质的影响

由表 8 可知,灌溉只在 2016 年对棉花纤维长度与整齐度的影响达到显著差异 ($P < 0.05$)。氮肥连续 2 年对棉花纤维长度、纤维整齐度及断裂比强度的影响均达到极显著差异 ($P < 0.01$)。灌溉与氮肥的交互作用连续 2 年对棉花纤维长度、纤维整齐度及断裂比强度的影响均未达到显著性差异。2015—2016 年非充分灌溉与常规灌溉下各氮肥处理的影响如下: N300 和 N450 处理下各指标均无显著性差异 (2016 年常规灌溉下纤维长度除外),但两者与 N0 及 N150 处理间各指标大都存在显著性差异;连续 2 年棉花纤维长度、纤维整齐度及断裂比强度均表现为 N300 > N450 > N150 > N0。非充分灌溉下连续 2 年 N150、N300、N450 处理纤维长度较 N0 处理分别增加了 3.8%~5.4%、8.2%~9.5%、8.0%~9.2%;纤维整齐度较 N0 处理分别增加了 2.3%~3.5%、5.9%~7.9%、5.4%~7.5%;断裂比强度较 N0 处理分别增加了 4.1%~4.4%、7.3%~8.7%、6.5%~7.7%。常规灌溉下连续 2 年 N150、N300、N450 处理纤维长度较 N0 处理分别增加了 3.7%~4.2%、7.6%~7.9%、4.0%~7.6%;纤维整齐度较 N0 处理分别增加了 2.4%~3.3%、5.5%~7.5%、4.4%~7.4%;断裂比强

度较 N0 处理分别增加了 3.9%~4.9%、7.1%~7.6%、5.0%~6.1%。2015~2016 年非充分灌溉与常规灌溉下增施氮肥均以 N300 处理增加幅度较大,且非充分灌溉下 N300 处理补偿效应较常规灌溉下 N300 处理纤维长度、纤维整齐度及断裂比强度分别提高了 4.3%~20.1%、5.7%~7.3% 及 2.2%~12.5%。

3 讨论

土壤水分亏缺和营养不足是限制干旱、半干旱地区作物生长、生存和产量的两大主要因子,不仅直接影响植物生长和生存,也影响植物对养分的吸收和利用^[25-27]。王晓英等^[28]研究表明,同一氮素水平下,水分亏缺处理的植株生长量及氮素累积量都低于正常供水处理。祁有玲等^[29]研究表明,水分亏缺条件下施用氮肥对作物植株干物质累积及氮吸收具有明显的促进作用。王朝辉等^[30]研究显示,在水分亏缺条件下,增施一定量的氮肥后,作物干物质质量及植株氮素积累补偿效果提高显著。且干旱条件下增施氮肥能够促进同化物的形成及其向籽粒的转运,提高转移干物质对籽粒的贡献率,提高淀粉的积累速率^[31-32]。本试验与前人研究结果一致,同一氮素水平,非充分灌溉处理的干物质及氮素累积量与

表 8 不同处理棉花纤维长度、整齐度及断裂比强度
Table 8 Fiber length, uniformity and strength of cotton under different treatments

灌溉量 Irrigation (m ³ /hm ²)	氮水平 N level	2015			2016		
		长度 (mm) Length	整齐度 (%) Uniformity	断裂比强度 (CN/tex) Strength	长度 (mm) Length	整齐度 (%) Uniformity	断裂比强度 (CN/tex) Strength
2800	N0	26.02 c	79.02 c	24.02 c	26.12 d	80.53 c	24.00 c
	N150	27.05 b	81.88 b	25.04 b	27.61 c	82.46 b	25.10 bc
	N300	28.35 a	85.78 a	25.90 a	28.86 a	85.56 a	26.28 a
	N450	28.27 a	85.38 a	25.70 a	28.80 ab	85.08 a	26.00 ab
3800	N0	26.37 c	79.43 c	24.21 c	26.57 d	81.22 c	24.35 cd
	N150	27.37 b	82.18 b	25.19 b	27.70 bc	83.21 b	25.61 ab
	N300	28.62 a	85.83 a	26.06 a	28.80 ab	85.90 a	26.35 a
	N450	28.53 a	85.74 a	25.79 a	27.67 c	84.95 a	25.62 ab
F 值 F value							
灌溉 Irrigation (I)		0.44	3.24	0.43	10.92 *	7.25 *	1.53
氮肥 N level (N)		21.06**	94.62**	18.96**	142.95**	888.06*	48.70**
灌溉 × 氮肥 I × N		2.08	0.81	0.86	0.05	0.57	0.03

注 (Note): 同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different letters in a column mean significant differences among treatments ($P < 0.05$). *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$.

分配比例及积累速率均低于常规灌溉处理; 2 种灌溉量下各氮肥处理均以 N300 处理表现出较高的干物质与氮素积累量, 且向生殖器官分配的比例较高; 非充分灌溉下 N300 处理较常规灌溉下 N300 处理干物质与氮素积累补偿效应分别提高了 15.0%、0.7%, 干物质与氮素积累速率补偿效应分别提高了 0.9%、3.1%, 干物质与氮素向生殖器官分配补偿效应分别提高了 2.5%、5.1%。

王寅等^[33]试验发现, 在干旱胁迫下施肥对油菜籽的增产效果明显高于适时灌溉条件, 施肥是作物干旱胁迫下正常生长发育和提高产量的有效措施。褚丽丽等^[34]研究表明, 大豆产量的补偿或超补偿效应的产生是水分胁迫和氮素营养合力作用的结果, 任一条件的缺失都会影响产量补偿效应的产生。郝树荣等^[35]研究发现, 高水高肥并不一定高产, 轻旱与低氮具有明显的协同互作效应, 在保产的同时达到节水的目的, 可显著提高水、氮利用率。范雪梅等^[36]研究认为, 水分逆境明显降低小麦粒重、产量和淀粉产量, 且干旱处理下增施氮肥有利于粒重、产量和淀粉产量的提高。谷晓博等^[37]研究显示, 适宜增施氮肥对水分胁迫存在补偿效应, 对产量表现出一定的补偿效应, 补偿效果随施氮量的增加先增加后降低, 且显著提高作物水分利用率。本试验与前人研究结

果一致, 非充分灌溉下增施氮肥的补偿效果表现为 $N300 > N450 > N150 > N0$; 非充分灌溉下各氮肥处理的籽棉产量均低于常规灌溉; 非充分灌溉下增施氮肥均以 N300 处理补偿效应较为明显, 表现在籽棉增产率、氮肥农学利用率及水、氮利用率方面, 较常规灌溉下 N300 处理补偿效应分别提高了 6.1%~8.8%、4.3%~8.2%、6.1%~8.8%、17.3%~17.9%。

邹小云等^[13]研究认为, 水分对油菜生长发育的影响大于氮素养分; 本试验结果表明, 氮肥对棉花生长发育的影响大于水分, 原因可能为本试验田土壤水分状况良好、土壤基础养分含量较高的原因, 也有可能是不同作物和水分亏缺时期的原因, 这有待于进一步研究。水分胁迫对作物的影响一定程度上是从根部引起的^[13]。本试验主要研究棉花地上部分, 因此, 非充分灌溉下增施氮肥对棉花根系发育特征的影响有待进一步研究。

4 结论

施氮 300 kg/hm² 下, 非充分灌溉与常规灌溉相比, 籽棉产量差异不显著, 但籽棉增产率提高了 6.1%~8.8%, 主要是因为氮肥对棉株养分供应补偿较多, 在一定程度上补偿了棉花因水分不足所造成的影响; 干物质向生殖器官分配比例提高了 24.0%, 氮素

向生殖器官转移率提高了 5.1%，从而使氮肥农学利用率及氮肥利用率提高。非充分灌溉下补偿作用是通过棉株干物质向生殖器官分配比例和氮素转移率提高而达到的。因此，在南疆自然生态条件下，以非充分灌溉下施氮 300 kg/hm² 时棉花具有适宜干物质与氮素积累量，生殖器官分配比例及氮素转移率较高，水、氮利用率最高，分别为 2.1%~2.3%、32.9%~37.4%，且节水 26.3%。

参 考 文 献:

- [1] 吴立峰, 张富仓, 周罕觅, 等. 不同滴灌施肥水平对北疆棉花水分利用率和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(20): 137-146.
Wu L F, Zhang F C, Zhou H M, *et al.* Effect of drip irrigation and fertilizer application on water use efficiency and cotton yield in North of Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(20): 137-146.
- [2] Wanjura D F, Dan R U, Mahan J R, *et al.* Cotton yield and applied water relationships under drip irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2002, 55(3): 217-237.
- [3] 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[J]. 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[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(1): 25-27.
- [4] 寇丹, 苏德荣, 吴迪, 等. 地下调亏滴灌对紫花苜蓿耗水、产量和品质的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(2): 116-123.
Kou D, Su D R, Wu D, *et al.* Effects of regulated deficit irrigation on water consumption, hay yield and quality of alfalfa under subsurface drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(2): 116-123.
- [5] 李秧秧, 邵明安. 小麦根系对水分和氮肥的生理生态反应[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(4): 383-388.
Li Y Y, Shao M A. Physio-ecological response of spring wheat root to water and nitrogen[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2000, 6(4): 383-388.
- [6] Aqueel M A, Leather S R. Effect of nitrogen fertilizer on the growth and survival of *Rhopalosiphum padi* (L.) and *Sitobion avenae* (F.) (Homoptera: Aphididae) on different wheat cultivars[J]. Crop Protection, 2011, 30(2): 216-221.
- [7] Sandhu S S, Mahal S S, Vashist K K, *et al.* Crop and water productivity of bed transplanted rice as influenced by various levels of nitrogen and irrigation in northwest India[J]. Agricultural Water Management, 2011, 104(1): 32-39.
- [8] Reynolds J F, Kemp P R, Ogle K, *et al.* Modifying the 'pulse-reserve' paradigm for deserts of North America: precipitation pulses, soil water, and plant responses[J]. Oecologia, 2004, 141(2): 194-210.
- [9] 薛惠云, 张永江, 刘连涛, 等. 干旱胁迫与复水对棉花叶片光谱、光合和荧光参数的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(11): 2386-2393.
Xue H Y, Zhang Y J, Liu L T, *et al.* Responses of spectral reflectance, photosynthesis and chlorophyll fluorescence in cotton during drought stress and rewatering[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(11): 2386-2393.
- [10] 赵丽英, 邓西平, 山仑. 水分亏缺下作物补偿效应类型及机制研究概述[J]. 应用生态学报, 2004, 15(3): 523-526.
Zhao L Y, Deng X P, Shan L. A review on types and mechanisms of compensation effect of crops under water deficit[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(3): 523-526.
- [11] 张岁岐, 山仑, 薛青武. 氮磷营养对小麦水分关系的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(2): 147-151.
Zhang S Q, Shan L, Xue Q W. Effect of nitrogen and phosphorus nutrition on water relation of spring wheat[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2000, 6(2): 147-151.
- [12] 康晓育, 常聪, 孙协平, 等. 低氮和干旱胁迫对富士和秦冠生长及氮素利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 965-973.
Kang X Y, Chang C, Sun X P, *et al.* Effect of nitrogen and drought stress on growth and nitrogen use efficiency for Fuji and Qinguan apple seedlings[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(4): 965-973.
- [13] 邹小云, 刘宝林, 宋来强, 等. 施氮量与花期水分胁迫对不同氮效率油菜产量性能及氮肥利用效率的影响[J]. 华北农学报, 2015, 30(2): 220-226.
Zou X Y, Liu B L, Song L Q, *et al.* Effects of nitrogen application and water stress at flowering stage on yield performance parameters and nitrogen use efficiency in rapeseed with different nitrogen use efficiency[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2015, 30(2): 220-226.
- [14] 段云佳, 谭玲, 张巨松, 等. 施氮量对枣棉间作系统棉花干物质和氮素积累的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(6): 1441-1448.
Duan Y J, Tan L, Zhang J S, *et al.* Effects of different nitrogen fertilizer levels on dry matter and N accumulation of cotton under jujube and cotton intercropping[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(6): 1441-1448.
- [15] 吴自明, 王竹青, 李木英, 等. 后期水分亏缺与增施氮肥对杂交稻叶片光合功能的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(3): 494-505.
Wu Z M, Wang Z Q, Li M Y, *et al.* Effect of water shortage and increasing nitrogen application on photosynthetic function of different hybrid rice combinations at grain filling stage[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(3): 494-505.
- [16] Read J J, Reddy K R, Jenkins J N. Yield and fiber quality of upland cotton as influenced by nitrogen and potassium nutrition[J]. European Journal of Agronomy, 2006, 24(3): 282-290.
- [17] 马溶慧, 许乃银, 张传喜, 等. 氮素对不同开花期棉铃纤维比强度形成的生理基础的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(12): 2618-2626.
Ma R H, Xu N Y, Zhang C X, *et al.* Roles of nitrogen fertilization in regulating the physiological bases of fiber specific strength formation in cotton bolls bloomed at different dates[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(12): 2618-2626.
- [18] 薛晓萍, 周治国, 张丽娟, 等. 棉花花后临界氮浓度稀释模型的建立及在施氮量调控中的应用[J]. 生态学报, 2006, 26(6): 1781-1791.
Xue X P, Zhou Z G, Zhang L J, *et al.* Development and application of critical nitrogen concentration dilution model for cotton after flowering[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(6): 1781-1791.
- [19] 阿丽艳·肉孜, 郭仁松, 杜强, 等. 施氮量对枣棉间作棉花干物质积累、产量与品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(3): 761-767.
Aliyan Rouzi, Guo R S, Du Q, *et al.* Effects of nitrogen fertilization rate in jujube-cotton intercropping on dry matter accumulation and

- yield and quality of cotton[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(3): 761–767.
- [20] 张亚洁, 周戡然, 杜斌, 等. 不同种植方式下氮素营养对陆稻和水稻产量的影响[J]. *作物学报*, 2008, 34(6): 1005–1013.
- Zhang Y J, Zhou Y R, Du B, *et al.* Effects of nitrogen nutrition on grain yield of upland and paddy rice under different cultivation methods[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(6): 1005–1013.
- [21] 闫曼曼, 郑剑超, 张巨松, 等. 调亏灌溉对海岛棉生物量和氮素累积分配及产量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(7): 841–850.
- Yan M M, Zheng J C, Zhang J S, *et al.* Effects of regulated deficit irrigation on accumulation and distribution of biomass and nitrogen, and yield of island cotton[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(7): 841–850.
- [22] 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 Z 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.
- [23] 刘瑞显, 郭文琦, 陈兵林, 等. 氮素对花铃期干旱再复水后棉花纤维比强度形成的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(3): 662–669.
- Liu R X, Guo W Q, Chen B L, *et al.* Effects of nitrogen on cotton fiber strength formation under water stress and re-watering during the flowering and boll-forming stage[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(3): 662–669.
- [24] 牛静. 花铃期干旱胁迫复水后棉花根系的补偿机制研究[D]. 北京: 中国农业科学院硕士学位论文, 2016.
- Niu J. Research on the compensatory mechanisms of cotton root under drought stress after re-watering during the flowering and boll-forming stage[D]. Beijing: MS Thesis of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016.
- [25] Monclus R, Dreyer E, Villar M, *et al.* Impact of drought on productivity and water use efficiency in 29 genotypes of *Populus deltoides* × *Populus nigra*[J]. *New Phytologist*, 2006, 169(4): 765–777.
- [26] Song C J, Ma K M, Qu L Y, *et al.* Interactive effects of water, nitrogen and phosphorus on the growth, biomass partitioning and water-use efficiency of *Bauhinia faberi* seedlings[J]. *Journal of Arid Environments*, 2010, 74(9): 1003–1012.
- [27] Wu F Z, Bao W K, Zhou Z Q, *et al.* Carbon accumulation, nitrogen and phosphorus use efficiency of *Sophora davidii* seedlings in response to nitrogen supply and water stress[J]. *Journal of Arid Environments*, 2009, 73(12): 1067–1073.
- [28] 王晓英, 贺明荣, 刘永环, 等. 水氮耦合对冬小麦氮肥吸收及土壤硝态氮残留淋溶的影响[J]. *生态学报*, 2008, 28(2): 685–694.
- Wang X Y, He M R, Liu Y H, *et al.* Interactive effects of irrigation and nitrogen fertilizer on nitrogen fertilizer recovery and nitrate N movement across soil profile in a winter wheat field[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 685–694.
- [29] 祁有玲, 张富仓, 李开峰. 水分亏缺和施氮对冬小麦生长及氮素吸收的影响[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(10): 2399–2405.
- Qi Y L, Zhang F C, Li K F. Effects of water deficit and nitrogen fertilization on winter wheat growth and nitrogen uptake[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(10): 2399–2405.
- [30] 王朝辉, 王兵, 李生秀. 缺水与补水对小麦氮素吸收及土壤残留氮的影响[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(8): 1339–1343.
- Wang Z H, Wang B, Li S X. Influence of water deficit and supplemental irrigation on nitrogen uptake by winter wheat and nitrogen residual in soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(8): 1339–1343.
- [31] 王月福, 于振文, 李尚霞, 等. 小麦籽粒灌浆过程中有关淀粉合成酶的活性及其效应[J]. *作物学报*, 2003, 29(1): 75–81.
- Wang Y F, Yu Z W, Li S X, *et al.* Activity of enzymes related to starch synthesis and their effect during the filling of winter wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2003, 29(1): 75–81.
- [32] 李世清, 邵明安, 李紫燕, 等. 小麦籽粒灌浆特征及影响因素的研究进展[J]. *西北植物学报*, 2003, 23(11): 2031–2039.
- Li S Q, Shao M Q, Li Z Y, *et al.* Review of characteristics of wheat grain fill and factors to influence it[J]. *Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica*, 2003, 23(11): 2031–2039.
- [33] 王寅, 鲁剑巍, 李坤, 等. 越冬期干旱胁迫对油菜施肥效果的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(5): 1203–1208.
- Wang Y, Lu J W, Li X K, *et al.* Effects of drought stress on fertilizer use efficiency of rapeseed during wintering[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(5): 1203–1208.
- [34] 褚丽丽, 张忠学. 氮素营养与水分胁迫对大豆产量补偿效应的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(10): 2665–2670.
- Chu L L, Zhang Z X. Effects of nitrogen nutrition and water stress on compensation effect of the yield of soybean[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(10): 2665–2670.
- [35] 郝树荣, 郑姬, 冯远周, 等. 水稻拔节期水氮互作的后效性影响研究[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(3): 92–96.
- Hao S R, Zheng J, Feng Y Z, *et al.* After effects of water-nitrogen interaction on rice at jointing stage[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(3): 92–96.
- [36] 范雪梅, 姜东, 戴廷波, 等. 花后干旱或渍水下氮素供应对小麦光合和籽粒淀粉积累的影响[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(10): 1883–1888.
- Fan X M, Jiang D, Dai T B, *et al.* Effects of nitrogen supply on flag leaf photosynthesis and grain starch accumulation of wheat from its anthesis to maturity under drought or waterlogging[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(10): 1883–1888.
- [37] 谷晓博, 李援农, 杜娅丹, 等. 不同施氮水平对返青期水分胁迫下冬油菜补偿效应的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(5): 572–581.
- Gu X B, Li Y N, Du Y D, *et al.* Compensative impact of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) affected by water stress at regreening stage under different nitrogen rates[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(5): 572–581.