

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190791

解婷婷, 单立山, 苏培玺. 不同施氮量下干旱胁迫对棉花生长及种内关系的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(5): 643–651

XIE T T, SHAN L S, SU P X. Effects of drought stress on cotton growth and intraspecific relationship under different nitrogen application rates[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(5): 643–651

不同施氮量下干旱胁迫对棉花生长及种内关系的影响*

解婷婷¹, 单立山^{1**}, 苏培玺²

(1. 甘肃农业大学林学院 兰州 730070; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院/寒旱区陆面过程与气候变化重点实验室 兰州 730000)

摘 要: 土壤水分和氮肥是影响荒漠绿洲区作物生长和种内关系的主要因素。为明确不同施氮量下干旱胁迫对棉花产量以及种内关系的影响, 本研究以集群栽培(1 穴 3 株)下棉花为研究对象, 设置 3 种施氮量 [300 kg(N)·hm⁻²、225 kg(N)·hm⁻²、150 kg(N)·hm⁻²] 和 3 种水分处理(正常水分、中度干旱胁迫、重度干旱胁迫), 测定了不同处理下棉花的生长指标和棉花产量, 分析了不同处理下棉花种内关系的变化。结果表明: 1) 同一施肥条件下, 2016 年和 2017 年棉花株高在重度干旱胁迫下显著降低, 而茎粗随干旱胁迫加剧显著降低, 但叶面积随干旱胁迫加剧却有所增加, 且在中度干旱胁迫下的叶面积最大。2) 同一施肥条件下, 与正常水分相比, 中度和重度干旱胁迫下棉花的茎秆生物量均显著下降; 叶片生物量和籽棉产量在中度干旱胁迫下最高, 在重度干旱胁迫下却降低。3) 在当地施氮量 300 kg·hm⁻² 下, 随着干旱胁迫的加剧, 相对邻体效应(relative neighbor effect, RNE) 数值从正值变为负值; 在氮肥减少处理(225 kg·hm⁻²) 下, 随着干旱胁迫的加剧, RNE 数值先升高后降低, 而在施氮量为 150 kg·hm⁻² 处理下, RNE 数值随着干旱的加剧逐渐降低, 且均为负值。总之, 在当地施氮量和中度干旱胁迫下棉花能够获得较高的籽棉产量, 且在此处理下棉花的种内关系为助长关系; 其他处理均降低了棉花的产量, 并使得棉花的种内关系转变为竞争关系。

关键词: 棉花; 施氮量; 干旱胁迫; 生物产量; 种内关系

中图分类号: S181

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



Effects of drought stress on cotton growth and intraspecific relationship under different nitrogen application rates*

XIE Tingting¹, SHAN Lishan^{1**}, SU Peixi²

(1. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. Northwest Ecological and Environmental Resources Institute, Chinese Academy of Sciences / Key Laboratory of Land Surface Process and Climate Change in Cold and Arid Regions, Lanzhou 730000, China)

* 国家自然科学基金项目(31960245)、甘肃农业大学公招博士科研启动基金(GAU-KYQD-2018-07)和甘肃农业大学学科建设基金项目(GAU-XKJS-2018-108, GAU-XKJS-2018-104)资助

** 通信作者: 单立山, 主要从事荒漠植物生态学方面的研究。E-mail: shanls@gsau.edu.cn

解婷婷, 主要从事干旱区植物生理生态学方面的研究。E-mail: xieting1026@126.com

收稿日期: 2019-11-08 接受日期: 2020-02-10

* This research was funded by the National Natural Science Foundation of China (31960245), the Scientific Research Start-up Funds for Openly-Recruited Doctors of Gansu Agricultural University (GAU-KYQD-2018-07), and the Special Funds for Discipline Construction of Gansu Agricultural University (GAU-XKJS-2018-108, GAU-XKJS-2018-104).

** Corresponding author, E-mail: shanls@gsau.edu.cn

Received Nov. 8, 2019; accepted Feb. 10, 2020

Abstract: Soil, water, and nitrogen fertilizer are the main factors which affect crop growth and intraspecific relationships in the desert oasis region, but little is known about the effects of drought stress on interspecific or intraspecific relationships under different nitrogen application rates. This study aimed to investigate the response of yield to drought stress under different nitrogen application rates and analyze changes in the intraspecific relationship of cotton under different treatments. A field experiment was conducted in Gansu Province of China, the growth parameters and yield of cotton were measured, and the changes in intraspecific relationships were analyzed under three nitrogen applications ($300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) and water treatments (normal water, moderate drought stress, and serious drought stress). The results showed that: 1) under the same nitrogen application rate, the plant height of cotton significantly decreased under serious drought stress in 2016 and 2017, and the stem diameter significantly reduced as the drought stress intensified, but the leaf area increased slightly with increasing drought stress and was highest in moderate drought stress conditions. 2) The stem biomass significantly decreased in conjunction with decreased water conditions under the same nitrogen application rate, and the leaf biomass and seed cotton yield were highest under moderate drought stress, and decreased under serious drought stress. 3) Under the local nitrogen application rate of $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, the relative neighbor effect (RNE) changed from positive to negative with increasing drought stress. The RNE first increased and then decreased with increasing drought stress under the $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ treatment, and the RNE significantly reduced with increasing drought condition and the values were all negative in the $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ treatment. In summary, the combination of local nitrogen application rate of $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and moderate drought stress resulted in high cotton yield, and intraspecific facilitation. The cotton yield decreased under the other treatments and the interactions all demonstrated intraspecific competition.

Keywords: Cotton; Nitrogen application rate; Drought stress; Biomass yield; Intraspecific relationship

植物的相互作用一直以来都是生态学家关注和争论的热点之一,它包括正、负两个方面。这种正负相互作用关系的变化会影响到植物个体的形态特征和分布、群落内物种多样性的变化,以及生态系统的结构和功能^[1-3]。在自然界中,植物间的相互作用关系类型及强度会随着环境条件的变化而改变^[4]。1994 年首次提出的“胁迫梯度假说”(stress gradient hypothesis, SGH)认为当环境条件较好时,植物间的负相互作用关系占主导地位;当环境条件变差时,植物间的正相互作用会逐渐上升,并会随着环境的恶劣程度增加而增强。目前,有众多的研究结果支持该假说。如 Callaway 等^[5]研究指出,在低海拔地区气候条件较为适宜时,竞争作用占主导地位;随着海拔升高,气候条件变得较为恶劣时,植物群落内的促进作用占优势地位。但也有一些研究不支持该假说,认为植物间的相互作用关系会出现从竞争到促进又回到竞争的这种变化,并不是随着胁迫的增加,正相互作用增加^[6-7]。目前,在生态学研究,常用邻体效应定量反映植物相互作用的强度^[8],而邻体效应就是指植物之间的相互作用,反映了邻体植物的存在对目标植物生长、繁殖等产生的影响。因此,进一步研究胁迫环境下植物间的相互作用关系,可以为生物多样性的维持提供重要的理论支持,同时对于农业生产也具有重要的指导意义。

在农业生产中,土壤水分和养分作为作物生长、产量和品质的重要影响因子,土壤水分和养分

的变化所引起的水肥亏缺是植物所面临的环境胁迫之一。目前,有关水肥亏缺下植物的相互作用关系已开展较多研究^[9-11]。如穆亚楠等^[12]研究得出,水位仅对大米草(*Spartina anglica*)和蘆草(*Scirpus triquetra*)的根生物量及叶片数具有显著影响,大米草种间相对邻里效应指数均显著大于种内相对邻里系数。周建等^[13]研究得出,施氮量的增加显著促进了空心莲子草 [*Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb.]和莲子草 [*A. sessilis* (L.) DC.]的生长,但是对二者的种间竞争关系却没显著影响,且施氮频率对两种植物的生长以及种间关系均没有显著影响。同时,两种植物在竞争关系中表现出了不同的生物量分配策略,空心莲子草将更多的生物量分配到茎,而莲子草则将更多的生物量分配到根系中。近年来,我们研究发现 1 穴 3 株(集群栽培)种植方式下棉花 (*Gossypium hirsutum* L.)的产量和水分利用效率显著提高^[14];同时得出集群栽培改变了棉花的种内关系,从而使得生物产量更多地分配到了生殖器官^[15]。但关于不同施氮量下干旱胁迫是否改变了棉花种内关系的研究还相对缺乏。本研究以集群栽培下棉花为研究对象,通过设置不同的水分和施氮水平,以当地的灌溉水平和施氮水平为对照,研究不同施氮量下干旱胁迫对棉花种内关系的影响,拟回答以下科学问题: 1)不同施氮量下干旱胁迫对棉花的生物产量的分配有何影响? 2)不同施氮量下干旱胁迫对集群栽培下棉花种内关系的影响是否一致? 研究结果可为干旱区棉花的水分管理提供支撑,同时也为植

物种内关系的研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验区位于黑河中游甘肃省临泽县北部绿洲边缘, 属干旱荒漠气候类型, 多年平均降水量为 116.8 mm, 年蒸发量 2 390 mm, 为降水量的 20 多倍; 年平均气温 7.6 °C, 最高气温 39.1 °C, 最低气温 -27 °C, 年积温(≥ 10 °C)为 3 088 °C, 无霜期 165 d。主风向为西北风, 风沙活动集中在 3—5 月, 年均风速 $3.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 大于 8 级大风日数年均 15 d; 年日照时数为 3 045 h; 冻土深度约 1.0 m。干旱、高温和多风是其主要的气候特点^[16]。

试验于 2016 年和 2017 年在中国科学院西北生态环境与资源研究院临泽内陆河流域研究站 (39°21'N, 100°02'E, 海拔 1 400 m) 开展。试验场用油毡、聚乙烯棚膜和砖及水泥修筑成 4 m×4 m 的防侧渗无底小区。试验观测地 0~160 cm 土壤为灌溉风沙土, 0~20 cm 耕作层粉粒和沙粒占 90%以上; 土壤有机质含量 $15.8 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效氮 $37.35 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效磷 $48.51 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效钾 $210.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

本试验采取二因素裂区试验设计。主区为施氮处理, 设 3 个水平: $300 \text{ kg}(\text{N})\cdot\text{hm}^{-2}$ (当地平均施氮水平, F1)、 $225 \text{ kg}(\text{N})\cdot\text{hm}^{-2}$ (F2)、 $150 \text{ kg}(\text{N})\cdot\text{hm}^{-2}$ (F3)。副区为水分处理, 设 3 个水平: 正常水分 (0~60 cm 土层土壤含水量保持在田间持水量的 $70\%\pm 5\%$, W1)、中度干旱胁迫 (0~60 cm 土层土壤含水量保持在田间持水量的 $50\%\pm 5\%$, W2) 和重度干旱胁迫 (0~60 cm 土层土壤含水量保持在田间持水量的 $30\%\pm 5\%$, W3)。共 9 个处理, 每个处理重复 3 次, 共 27 个小区, 每个小区面积为 16 m^2 。各处理磷肥、钾肥作为基肥于播种前一次性施入 (P_2O_5 $50 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, K_2O $90 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), 氮肥分别于播种前、现蕾期和开花期以 2:2:1 比例分 3 次施入。

本试验供试棉花为早熟陆地棉品种‘新陆早 8 号’。采用 1 穴 3 株集群栽培方式种植, 带行株距为 $50 \text{ cm}\times 30 \text{ cm}\times 28 \text{ cm}$ ($26.7 \text{ 万株}\cdot\text{hm}^{-2}$), 2016 年和 2017 年分别于 4 月 15 日和 4 月 17 日播种, 5 月 25 日和 5 月 27 日定苗, 9 月底至 10 月初收获。

2016 年 5 月 23 日和 2017 年 5 月 25 日于棉花苗期第 1 次灌水时开始进行水分控制, 期间每隔 2 d 采用土钻对各小区的土壤进行取样, 取样深度为 0~60 cm (20 cm 为一层), 采用烘干法测定土壤重量含水量, 最后根据试验设计的土壤含水量与实际土

壤含水量的差值计算各小区的需水量, 于次日清晨利用水泵向各小区进行相应的水量灌溉, 利用水表控制水量, 从而使各小区棉花根系主要分布层 (0~60 cm) 内的土壤含水量保持在设计水平。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 生长指标的测定

为了排除边际效应, 在棉花收获期, 每个小区选 9 m^2 的样区, 在取样面积内随机选取代表性植株 10 株, 测定株高、茎粗和总叶面积。

1.3.2 生物产量的测定

上节中所选样区内用于测定生长指标的植株分成茎秆、叶片和籽棉, 在 80 °C 烘箱内烘干 48 h 后称重。同时对所选样区内棉花的全部株数和铃数进行调查, 折算出单株结铃数和单位面积总铃数, 以实收籽棉产量计产, 通过计算得出单位面积的籽棉产量 ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)。

1.3.3 种内关系的测定

采用相对邻体效应 (relative neighbor effect, RNE) 评价棉花的种内关系^[17]。计算公式为:

$$\text{RNE} = (M - C) / \max(M, C) \quad (1)$$

式中: M 为水分或施氮胁迫条件下棉花的平均产量, C 为正常水分和施氮条件下作物的平均产量。RNE 的数值在 -1 到 1 之间, 负值表示作物之间负相互作用关系, 即竞争作用, 正值表示作物之间正相互作用关系, 即促进作用。在竞争 (RNE 为负值) 情况下, RNE 的数值越大 (或绝对值越小), 表示作物个体之间的竞争强度越小; 在促进 (RNE 为正值) 情况下, RNE 的数值越大, 表示作物个体之间的促进强度越高。

1.4 统计分析

利用 SPSS 15.0 软件中的 3 因素方差分析 (three-way ANOVA) 检验水分、施氮量和年份及其交互作用对棉花生长指标 (株高、茎粗、叶面积、茎秆生物量、叶片生物量和籽棉产量) 及相对邻体效应的影响。用 Duncan 方法多重比较不同水分处理下棉花生长指标的差异 ($\alpha=0.05$), 作图采用 Origin 7.0 软件。

2 结果与分析

2.1 不同水氮条件对棉花生长参数的影响

由图 1 可以看出, 2016 年和 2017 年同一施氮量条件下, 随着干旱胁迫的加剧, 棉花株高和茎粗均降低, 但叶面积先升高后降低。与正常水分条件相比, 中度干旱胁迫下棉花的株高降低 $3.21\%\sim 4.98\%$, 重度干旱胁迫下降低 $6.49\%\sim 7.75\%$; 茎粗分别降低 $2.38\%\sim 4.08\%$ 和 $5.36\%\sim 8.67\%$ 。在中度干旱胁迫下叶面积增加 $2.38\%\sim 3.72\%$, 而重度干旱胁迫下却降低

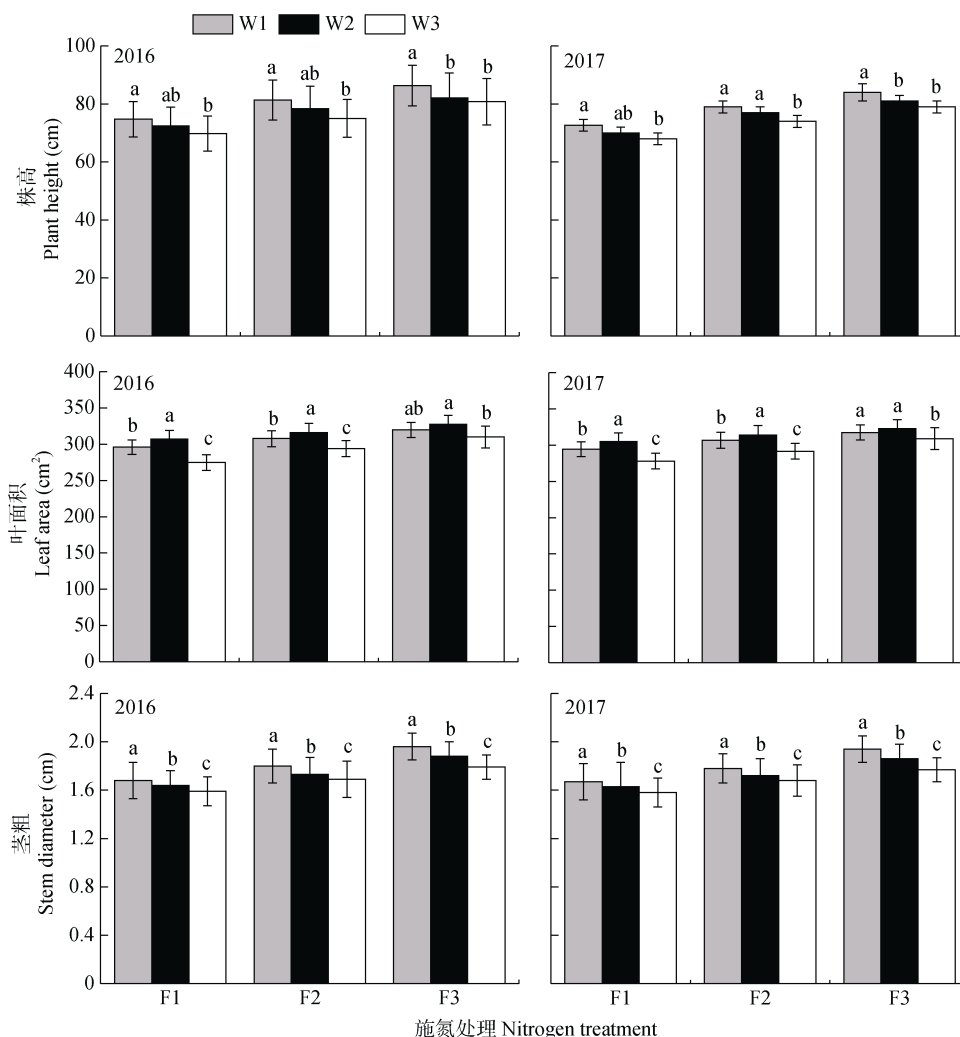


图 1 不同施氮量处理干旱胁迫对集群栽培(1穴3株)棉花的株高、叶面积和茎粗的影响

Fig. 1 Plant height, leaf area and stem diameter of cluster-cultivated cotton (3 plants in 1 hole) under different water and nitrogen treatments

F1、F2、F3 分别指施氮量 $300 \text{ kg(N)}\cdot\text{hm}^{-2}$ (当地平均施氮量)、 $225 \text{ kg(N)}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $150 \text{ kg(N)}\cdot\text{hm}^{-2}$; W1、W2、W3 分别指正常水分、中度干旱胁迫和重度干旱胁迫。不同小写字母表示同一施氮量下不同水分处理间差异在 $P<0.05$ 水平显著。F1, F2 and F3 represent the nitrogen application rates of $300 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (local average rate), $225 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, $150 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; W1, W2 and W3 represent the normal water, moderate drought stress and serious drought stress. Different lowercases indicate significant differences among different water treatments under the same nitrogen level at $P<0.05$ level.

3.03%~7.20%。差异显著性分析表明: 2016 年棉花株高正常水分条件(W1)显著高于重度干旱胁迫(W3)($P<0.05$), 而中度干旱胁迫与重度干旱胁迫差异不显著(F1 施氮量下除外); 2017 年棉花株高正常水分条件(W1)也显著高于重度干旱胁迫(W3), 而在 F1 和 F3 施氮量下中度干旱胁迫与重度干旱胁迫差异不显著。对于叶面积而言, 2016 年和 2017 年, F2 和 F3 施氮条件下, 3 种水分处理下棉花的叶面积存在显著差异; 而 F1 施氮条件下, 2016 年和 2017 年中度干旱胁迫的叶面积与重度干旱胁迫存在显著差异, 但与正常水分差异不显著。3 种施氮条件下, 2016 年和 2017 年 3 种水分条件下棉花茎粗均存在显著差异。3 因素方差分析表明: 水分和施氮对株高、叶面积和茎粗的影响达极显著水平($P<0.0001$), 年份对

株高和茎粗的影响达极显著水平($P<0.01$)。水分和施氮的交互作用对叶面积和茎粗的影响达极显著水平($P<0.01$), 其他因素的交互作用均不显著(表 1)。

2.2 不同水氮条件对棉花生物量和产量的影响

通过对不同水氮条件下棉花生物产量和经济产量的分析得出(图 2), 同一施氮条件下随着干旱胁迫的加剧, 棉花的茎秆生物量逐渐降低。与正常水分相比, 2016 年中度干旱胁迫下棉花茎秆生物量减少 1.5%~1.7%, 重度干旱胁迫下减少 2.6%~4.8%; 2017 年中度和重度干旱胁迫下茎秆生物量减少 1.6%~3.3%和 3.9%~4.3%。叶片生物量和籽棉产量先升高后降低, 与正常水分相比, 2016 年和 2017 年中度干旱胁迫下棉花叶片生物量分别增加 4.1%~14.3%和 2.1%~10.3%, 重度干旱胁迫下减少 4.8%~12.2%

表 1 水分、施氮和年份对集群栽培(1 穴 3 株)棉花生长指标的影响显著性分析
Table 1 Results of 3-way ANOVA of the effects of water condition, nitrogen application rate and time on growth of cluster-cultivated cotton (3 plants in 1 hole)

处理 Treatment	df	株高 Plant height		叶面积 Leaf area		茎粗 Stem diameter	
		F 值 F value	P 值 P value	F 值 F value	P 值 P value	F 值 F value	P 值 P value
水分 Water (W)	2	49.555	<0.000 1	160.762	<0.000 1	159.793	<0.000 1
施氮 Nitrogen application (N)	2	213.788	<0.000 1	199.839	<0.000 1	624.959	<0.000 1
年份 Year (Y)	1	16.124	<0.000 1	1.958	0.170	7.747	<0.010
水分×施氮 W × N	4	0.471	0.757	5.555	<0.010	7.836	<0.000 1
水分×年份 W × Y	2	0.314	0.733	0.664	0.521	0.005	0.995
施氮×年份 N × Y	2	0.095	0.910	0.452	0.640	0.074	0.929
水分×施氮×年份 W × N × Y	4	0.150	0.962	0.334	0.853	0.108	0.979

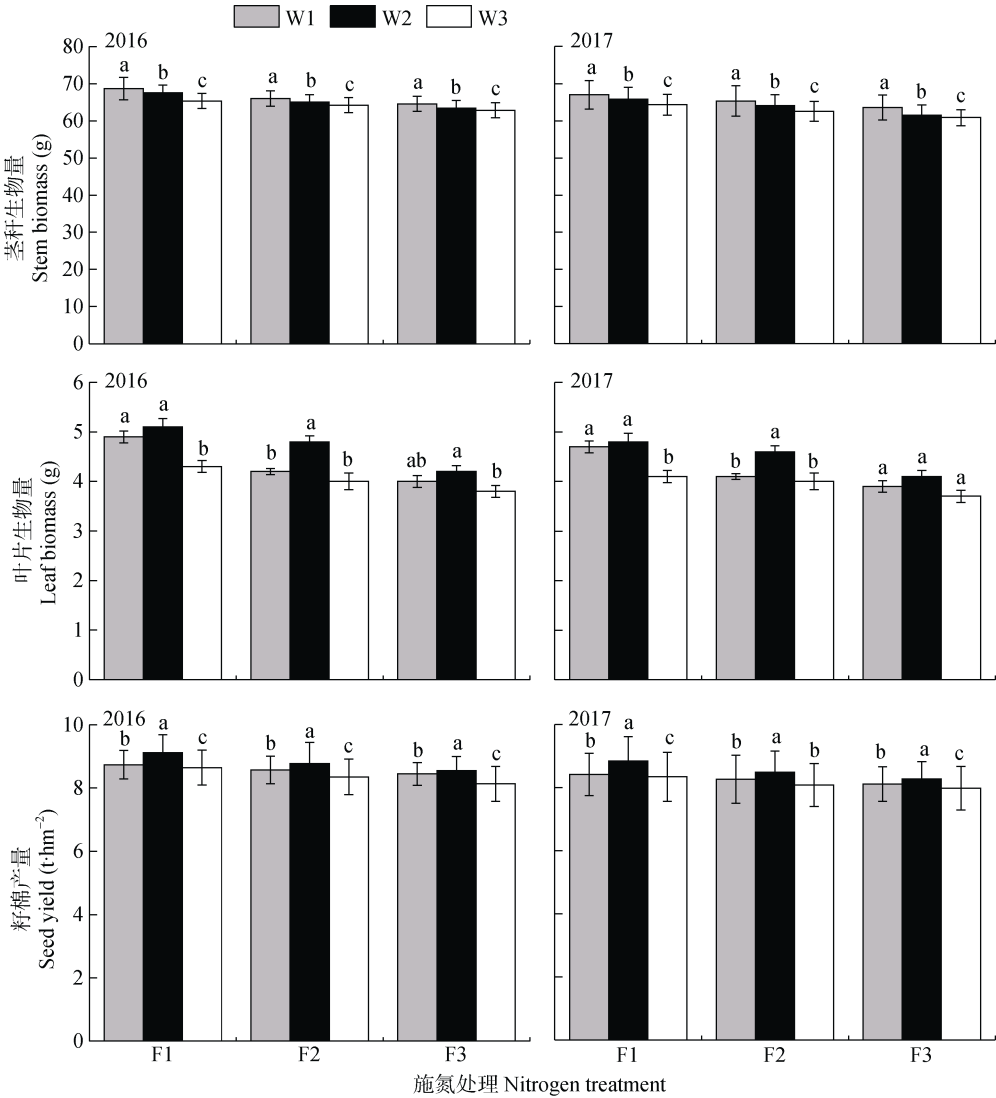


图 2 水分和施氮处理下集群栽培(1 穴 3 株)棉花茎秆和叶片生物量及籽棉产量

Fig. 2 Stem, leaf biomass and seed cotton yield of cluster-cultivated cotton (3 plants in 1 hole) under different water and nitrogen treatments

F1、F2、F3 分别指施氮量 300 kg(N)·hm⁻²(当地平均施氮量)、225 kg(N)·hm⁻²和 150 kg(N)·hm⁻²; W1、W2、W3 分别指正常水分、中度干旱胁迫和重度干旱胁迫。不同小写字母表示同一施氮量下不同水分处理间差异在 $P<0.05$ 水平上显著。F1, F2 and F3 represent the nitrogen application rates of 300 kg·hm⁻²(local average rate), 225 kg·hm⁻² and 150 kg·hm⁻²; W1, W2 and W3 represent the normal water, moderate drought stress and serious drought stress. Different lowercases indicate significant differences among different water treatments under the same nitrogen level at $P<0.05$ level.

和 2.4%~12.8%; 2016 年和 2017 年中度干旱胁迫下籽棉产量分别提高 0.1~0.38 t·hm⁻² 和 0.17~0.42 t·hm⁻², 比正常水分增加 1.2%~4.3% 和 2.1%~4.9%, 而重度干旱胁迫下籽棉产量分别减少 0.09~0.32 t·hm⁻² 和 0.08~0.13 t·hm⁻², 比正常水分降低 1.0%~3.8% 和 1.0%~1.6%。方差分析表明: 不同水分条件下棉花的茎秆生物量和籽棉产量均存在显著差异(除 2017 年 F2 施氮处理下的籽棉产量), 但对叶片生物量的影响因施氮量的不同而不同。这说明与正常水分相比, 集群栽培下, 水分减少到田间持水量 50% 时对棉花茎秆生物量就会产生负效应, 但是

却对叶片生物量和籽棉产量具有一定的正效应。三因素方差分析表明(表 2): 水分和施氮对茎秆生物量、叶片生物量和籽棉产量的影响达极显著水平 ($P<0.000\ 1$), 年份对茎秆生物量和籽棉产量的影响也达极显著水平 ($P<0.000\ 1$), 但对叶片生物量只具有显著影响 ($P<0.05$)。水分和施氮的交互作用对茎秆生物量和籽棉产量达极显著水平 ($P<0.000\ 1$); 水分和年份以及施氮和年份对茎秆生物量的交互作用也达显著水平, 三者的交互作用也达极显著水平 ($P<0.01$)。对于叶片生物量和籽棉产量而言, 水分和年份、施氮和年份以及三者的交互作用均不显著。

表 2 水分、施氮和年份对集群栽培(1 穴 3 株)棉花生物量的影响
Table 2 Effects of different water and fertilizer treatments on growth of cluster-cultivated cotton (3 plants in 1 hole)

处理 Treatment	df	茎秆生物量 Stem biomass		叶片生物量 Leaf biomass		籽棉产量 Seed cotton yield	
		F 值 F value	P 值 P value	F 值 F value	P 值 P value	F 值 F value	P 值 P value
水分 Water (W)	2	371.916	<0.000 1	32.886	<0.000 1	357.081	<0.000 1
施氮 Nitrogen application (N)	2	805.253	<0.000 1	43.050	<0.000 1	380.966	<0.000 1
年份 Year (Y)	1	349.246	<0.000 1	5.139	<0.050	461.932	<0.000 1
水分×施氮 W × N	4	8.882	<0.000 1	2.496	0.060	12.260	<0.000 1
水分×年份 W × Y	2	3.659	<0.050	0.217	0.806	2.824	0.073
施氮×年份 N × Y	2	5.281	<0.050	0.580	0.565	1.158	0.325
水分×施氮×年份 W × N × Y	4	5.686	<0.010	0.062	0.993	1.829	0.145

2.3 不同施氮量下干旱胁迫对相对邻体效应(RNE)的影响

从图 3 中可以看出, 2016 年和 2017 年, 在正常施氮处理(F1)下, 随着干旱胁迫的加剧, RNE 数值从正值变为负值; 在氮肥减少处理(F2)下, 随着干旱胁迫的加剧, RNE 数值先升高后降低; 而在 F3 处理下, RNE 数值随着干旱的加剧逐渐降低。这说明在正常施氮量下, 如果干旱胁迫加剧, 棉花种内的关系由助长作用转变为竞争作用; 而在其他水氮条件

下, 棉花的种内关系均为竞争关系, 且在施氮量最少的条件下, 这种竞争作用会随着水分胁迫的加剧而逐渐增强。分析表明: 水分处理和施氮处理均对 RNE 的影响极为显著 ($F=519.621$ 和 $F=898.005$, $P<0.000\ 1$), 时间也对 RNE 产生了极显著影响 ($F=10.27$, $P<0.01$)。3 因素交互作用中, 施氮和水分的交互作用达极显著水平 ($F=17.027$, $P<0.000\ 1$), 同时水分和时间以及三者的交互作用也达显著水平 ($F=3.924$ 和 $F=3.071$, $P<0.05$)。

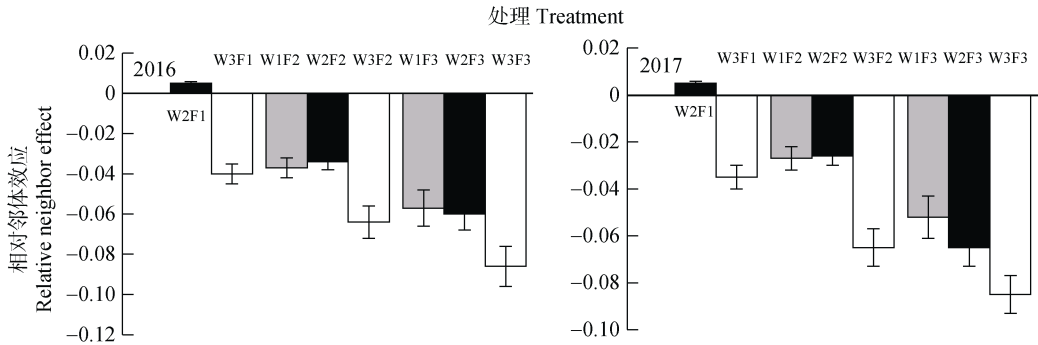


图 3 不同施氮量下干旱胁迫对集群栽培(1 穴 3 株)棉花相对邻体效应的影响

Fig. 3 Effect of water stress on relative neighbor effect of cluster-cultivated cotton (3 plants in 1 hole) under different nitrogen treatments
F1、F2、F3 分别指施氮量 300 kg(N)·hm⁻²(当地平均施氮量)、225 kg(N)·hm⁻² 和 150 kg(N)·hm⁻²; W1、W2、W3 分别指正常水分、中度干旱胁迫和重度干旱胁迫。F1, F2 and F3 represent the nitrogen application rates of 300 kg·hm⁻² (local average rate), 225 kg·hm⁻² and 150 kg·hm⁻²; W1, W2 and W3 represent the normal water, moderate drought stress and serious drought stress.

3 讨论

3.1 不同施氮量下干旱胁迫对棉花生物产量的影响

植物在遭受到水分或者养分胁迫时, 通常会通过改变生物量的分配来适应环境条件的变化。有研究表明, 同一水分条件下, 增加氮肥用量可以增加棉花产量, 而用量过大会导致产量下降^[18]。刘朋程等^[19]研究发现: 限量灌溉(播前酌情补灌, 生育期不灌溉)条件下, 棉花中早熟品种‘农大 601’和中熟品种‘冀棉 958’均可获得较理想叶面积指数和良好源库关系, 并能达到合理的水分利用效率和理想产量, 而较大幅度地降低了棉花早熟品种‘中棉所 50’的干物质积累量, 严重影响了生殖器官所占比重, 进而造成了大幅度的减产。张鹏等^[20]对燕麦(*Avena sativa* L.)的研究得出, 当施氮量较少时, 灌水量越大, 产量越大, 但差异不显著; 当施氮量较高时, 灌水量减少可以显著降低燕麦产量。本研究发现, 各施氮条件下, 随着干旱胁迫的加剧, 棉花个体的生长指标和茎秆生物量逐渐降低, 这与杜彩艳等^[21]对干旱胁迫下玉米(*Zea mays* L.)苗期植株生长的研究结果相一致, 同时也得出棉花籽棉产量在中度干旱胁迫下最高, 随着胁迫的进一步加剧, 籽棉产量又降低, 这与崔红艳等^[22]对胡麻(*Linum usitatissimum* L.)的研究结果一致, 但与栗丽等^[23]对小麦(*Triticum aestivum* L.)的研究结果不一致。这可能是因为在中度干旱胁迫下棉花个体在进行生物量分配时将更多的光合产物转移到生殖生长中, 胁迫加剧时, 棉花个体以降低蒸腾水分耗散和维持生命活动为主要策略, 光合速率显著降低, 各器官的生物产量和籽棉产量就显著降低。这表明在该地区各施氮量条件下, 水分的适度减少有利于棉花经济产量的增加。

3.2 不同施氮量下干旱胁迫对棉花种内关系的影响

在自然生态系统中, 植物群落之间的关系存在着正相互作用与竞争作用, 而且随着环境中有效资源的变化, 正相互作用与竞争作用之间会发生转变^[24], 即当环境中有效资源比较充足时, 竞争作用占主导地位, 而当有效资源匮乏时, 促进作用则起到主导作用。因此, 植物群落中种间或种内相互作用关系会随着资源的变化而处于动态平衡中。目前, 关于种间或种内关系的研究结果普遍支持“胁迫梯度假说”^[25], 即随着环境中胁迫的增加, 助长作用强度增加, 竞争作用减弱^[26-27]。但也有研究指出, 助长作用在中度胁迫条件下最强, 在非胁迫和极端胁迫条件下则表现为竞争^[28-29]。本研究得出在正常施氮量为 300 kg·hm⁻² 条件下, 中度干旱胁迫下棉花

种内的关系为助长作用, 这可能是棉花之间对水分胁迫环境有一定的缓解作用。但随着干旱的进一步加剧, 种内关系转变为竞争作用, 这与 Maestre 等^[30]的研究结果一致, 说明在重度干旱胁迫下, 由于水分的严重亏缺, 棉花个体为了自身的生长, 对土壤水分开始竞争。而在正常水分条件下, 随着施氮量的减少, 棉花的种内关系为竞争关系, 且竞争作用随着肥力胁迫的增强而逐渐增强, 这与庞芮^[31]的研究结果相反。原因可能是本研究针对的是棉花的一个物种, 在棉花生长中, 施氮量一旦减少, 棉花个体之间为了自身的生长, 就会开始对土壤中的养分产生竞争。在水分和施氮量均减少的情况下, 棉花的种内关系均为竞争, 而且随着胁迫的加剧, 种内关系竞争作用逐渐增强, 原因有可能是在这种条件下, 棉田中的养分和水分同时亏缺, 棉花个体为了自身的生存与发展, 从而就会与其他个体之间产生竞争, 有关机理还需要进一步的深入研究。

4 结论

本研究发现, 3 种施氮量条件下, 随着干旱胁迫的加剧, 棉花的茎秆生物量显著下降, 但叶片生物量和籽棉产量在中度干旱胁迫下最高。种内关系分析得出, 在正常施氮(300 kg·hm⁻²)处理下, 如果干旱胁迫加剧, 棉花种内的关系将由助长作用转变为竞争作用; 而在其他水肥条件下, 种内关系均为竞争作用, 且在减氮(150 kg·hm⁻²)处理下, 这种竞争作用会随着干旱胁迫的加剧而逐渐增强。但关于不同施氮量下棉花种内关系转变的机理仍有待于进一步的研究。

参考文献 References

- [1] YU F H, LI P X, LI S L, et al. *Kobresia tibetica* tussocks facilitate plant species inside them and increase diversity and reproduction[J]. Basic and Applied Ecology, 2010, 11(8): 743-751
- [2] LI P X, KRÜSI B O, LI S L, et al. Facilitation associated with three contrasting shrub species in heavily grazed pastures on the eastern Tibetan Plateau[J]. Community Ecology, 2011, 12(1): 1-8
- [3] LI P X, KRÜSI B O, LI S L, et al. Can *Potentilla fruticosa* Linn. shrubs facilitate the herb layer of heavily grazed pasture on the eastern Tibetan Plateau?[J]. Polish Journal of Ecology, 2011, 59(1): 129-140
- [4] CRAIN C M. Interactions between marsh plant species vary in direction and strength depending on environmental and consumer context[J]. Journal of Ecology, 2008, 96(1): 166-173
- [5] CALLAWAY R M, BROOKER R W, CHOLER P, et al. Positive interactions among alpine plants increase with stress[J]. Nature, 2002, 417(6891): 844-848

- [6] MAESTRE F T, CORTINA J. Do positive interactions increase with abiotic stress? A test from a semi-arid steppe[J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2004, 271(Suppl 5): S331–S333
- [7] MAESTRE F T, VALLADARES F, REYNOLDS J F. Is the change of plant-plant interactions with abiotic stress predictable? A meta-analysis of field results in arid environments[J]. *Journal of Ecology*, 2005, 93(4): 748–757
- [8] CHENG D L, WANG G X, CHEN B M, et al. Positive interactions: Crucial organizers in a plant community[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2006, 48(2): 128–136
- [9] 卜祥祺, 刘琳, 穆亚楠, 等. 水位波动对南美蟛蜞菊和蟛蜞菊种内及种间关系的影响[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(3): 797–804
- BU X Q, LIU L, MU Y N, et al. Effects of water level fluctuation on the inter-and intra-specific relationships between *Wedelia trilobata* and *W. chinensis*[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(3): 797–804
- [10] 于国磊. 水淹对克隆植物空心莲子草种内关系的影响[J]. *植物生态学报*, 2011, 35(9): 973–980
- YU G L. Effects of waterlogging on intraspecific interactions of the clonal herb *Alternanthera philoxeroides*[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35(9): 973–980
- [11] KANKANAMGE C E, KODITHUWAKKU H. Effect of interspecific competition on the growth and nutrient uptake of three macrophytes in nutrient-rich water[J]. *Aquatic Ecology*, 2017, 51(4): 625–634
- [12] 穆亚楠, 安树青, 智颖飙, 等. 水位对大米草和蘆草种内种间关系的影响[J]. *生态学报*, 2018, 37(4): 1010–1017
- MU Y N, AN S Q, ZHI Y B, et al. Effects of water level on intra- and inter-specific relationships of *Spartina anglica* and *Scirpus triquetra*[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(4): 1010–1017
- [13] 周建, 李红丽, 罗芳丽, 等. 施氮对空心莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)和莲子草(*Alternanthera sessilis*)种间关系的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(24): 8258–8267
- ZHOU J, LI H L, LUO F L, et al. Effects of nitrogen addition on interspecific competition between *Alternanthera philoxeroides* and *Alternanthera sessilis*[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(24): 8258–8267
- [14] 解婷婷, 苏培玺, 周紫鹃, 等. 集群栽培对棉花种内关系的影响[J]. *植物学报*, 2015, 50(1): 83–89
- XIE T T, SU P X, ZHOU Z J, et al. Effect of cluster planting pattern on intraspecific interactions of cotton[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2015, 50(1): 83–89
- [15] 解婷婷, 苏培玺, 周紫鹃, 等. 集群种植方式对棉花田间小气候效应和产量的影响[J]. *西北农业学报*, 2014, 23(3): 55–61
- XIE T T, SU P X, ZHOU Z J, et al. Effect of cluster planting on field microclimate and yield of cotton[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2014, 23(3): 55–61
- [16] SU P X, LIU X M, ZHANG L X, et al. Comparison of $\delta^{13}\text{C}$ values and gas exchange of assimilating shoots of desert plants *Haloxylon ammodendron* and *Calligonum mongolicum* with other plants[J]. *Israel Journal of Plant Sciences*, 2004, 52(2): 87–97
- [17] KIKVIDZE Z, KHETSURIAN L, KIKODZE D, et al. Seasonal shifts in competition and facilitation in subalpine plant communities of the central Caucasus[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2006, 17(1): 77–82
- [18] 宋兴虎, WAGAN T A, SOULIYANONH B, 等. 氮肥用量及其后效对棉花产量和生物量累积动态的影响[J]. *棉花学报*, 2018, 30(2): 145–154
- SONG X H, WAGAN T A, SOULIYANONH B, et al. Nitrogen fertilizer and its residual effect on cotton yield and biomass accumulation[J]. *Cotton Science*, 2018, 30(2): 145–154
- [19] 刘朋程, 孙红春, 刘连涛, 等. 限量灌溉对不同棉花品种干物质积累分配、产量和水分利用效率的影响[J]. *棉花学报*, 2018, 30(4): 316–325
- LIU P C, SUN H C, LIU L T, et al. Effects of limited irrigation on accumulation and distribution of dry matter, yield, and water use efficiency of different cotton varieties[J]. *Cotton Science*, 2018, 30(4): 316–325
- [20] 张鹏, 蒋静, 马娟娟, 等. 不同水氮处理对盐渍土水氮盐变化和燕麦产量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(5): 1–5
- ZHANG P, JIANG J, MA J J, et al. Effects of different irrigations and nitrogen applications on distribution of water, nitrogen and salt in saline soil as well as the yield of oat[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(5): 1–5
- [21] 杜彩艳, 段宗颜, 潘艳华, 等. 干旱胁迫对玉米苗期植株生长和保护酶活性的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2015, 33(3): 124–129
- DU C Y, DUAN Z Y, PAN Y H, et al. Effect of drought stress on growth and activities of antioxidant enzymes of maize seedling[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(3): 124–129
- [22] 崔红艳, 方子森. 水氮互作对胡麻干物质生产和产量的影响[J]. *西北植物学报*, 2016, 36(1): 156–164
- CUI H Y, FANG Z S. Effect of nitrogen and irrigation interaction on dry matter production and grain yield of oil flax under different irrigation modes[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalis Sinica*, 2016, 36(1): 156–164
- [23] 栗丽, 洪坚平, 王宏庭, 等. 水氮处理对冬小麦生长、产量和水氮利用效率的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(5): 1367–1373
- LI L, HONG J P, WANG H T, et al. Effects of watering and nitrogen fertilization on the growth, grain yield, and water- and nitrogen use efficiency of winter wheat[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(5): 1367–1373
- [24] PUGNAIRE F I, LUQUE M T. Changes in plant interactions along a gradient of environmental stress[J]. *Oikos*, 2001, 93(1): 42–49
- [25] BERTNESS M D, CALLAWAY R M. Positive interactions in communities[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 1994, 9(5): 191–193
- [26] SOLIVERES S, ELDRIDGE D J, HEMMINGS F, et al. Nurse plant effects on plant species richness in drylands: The role of grazing, rainfall and species specificity[J]. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 2012, 14(6): 1–11

- 402–410
- [27] MOLINA-MONTENEGRO M A, RICOTE-MARTÍNEZ N, MUÑOZ-RAMÍREZ C, et al. Positive interactions between the lichen *Usnea antarctica* (Parmeliaceae) and the native flora in Maritime Antarctica[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2013, 24(3): 463–472
- [28] TIELBÖRGER K, KADMON R. Temporal environmental variation tips the balance between facilitation and interference in desert plants[J]. *Ecology*, 2000, 81(6): 1544–1553
- [29] HOLMGREN M, CHEFFER M. Strong facilitation in mild environments: The stress gradient hypothesis revisited[J]. *Journal of Ecology*, 2010, 98(6): 1269–1275
- [30] MAESTRE F T, VALLADARES F, REYNOLDS J F. The stress-gradient hypothesis does not fit all relationships between plant-plant interactions and abiotic stress: Further insights from arid environments[J]. *Journal of Ecology*, 2006, 94(1): 17–22
- [31] 庞芮. 水肥胁迫对一年生植物种间关系的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2018: 23–25
- PANG R. Effects of water and fertilizer stress on species interaction in annual plant communities[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018: 23–25