



种植模式对机采棉生长及棉田水分利用效率的影响

姜艳¹,王鹏²,徐飞³,刘东洋¹

(1.石河子大学农学院农业资源与环境系,新疆石河子 832000;2.新疆农垦科学院作物研究所,新疆石河子 832000;3.新疆生产建设兵团果业有限公司,乌鲁木齐 830001)

摘要 为探讨当前新疆机采棉不同种植模式对棉花生长发育、产量及农田水分利用效率的影响,在新疆石河子市于2017年、2018年棉花生长期,设置4种机采棉种植模式,包括一膜三行(76 cm+76 cm+76 cm)、一膜四行(64 cm+12 cm)、一膜四行(66 cm+10 cm)和一膜六行(66 cm+10 cm)(分别标记为F₃₍₇₆₎、F₄₍₆₄₊₁₂₎、F₄₍₆₆₊₁₀₎和F₆₍₆₆₊₁₀₎),分析评价不同种植模式对棉花株高、叶面积指数、干物质积累量、籽棉产量以及水分利用效率(WUE)的影响。研究表明:低密度F₃₍₇₆₎种植模式下最有利于棉花株高、干物质积累量和叶面积指数的提高,从而提高棉花产量;而高密度F₆₍₆₆₊₁₀₎种植模式下棉花各项生长指标最不利于产量提高;F₄₍₆₆₊₁₀₎和F₄₍₆₄₊₁₂₎适中;其中F₄₍₆₆₊₁₀₎模式籽棉产量大于F₄₍₆₄₊₁₂₎模式。WUE表现为F₃₍₇₆₎最大,F₆₍₆₆₊₁₀₎最小,F₄₍₆₄₊₁₂₎和F₄₍₆₆₊₁₀₎模式下WUE差异不显著。因此,认为F₃₍₇₆₎种植模式最有利于提高棉花产量和WUE,在其种植模式下棉花群体抗旱性最强,F₄种植模式下的两种株行距配置F₄₍₆₄₊₁₂₎和F₄₍₆₆₊₁₀₎也有一定抗旱性;而F₆₍₆₆₊₁₀₎模式不利于产量提高,也不利于增强其抗旱性。该研究可为北疆机采棉节水灌溉下实施有效的种植模式提供理论依据。

关键词 机采棉;种植模式;水分;籽棉产量;形态指标

中图分类号 B210.2050

文献标志码 A

文章编号 1004-1389(2021)01-0093-09

棉花是新疆主要的经济作物之一,据统计当前新疆棉花种植面积达全国棉花总面积的76%,产量占全国总产量的84.6%,已成为新疆经济发展的主要支柱^[1-3]。然而由于新疆干旱荒漠区降水稀少,蒸发强烈,盐碱土分布广泛的气候背景,水资源严重匮乏已成为制约新疆棉花产业发展的关键问题。为了应对水资源短缺问题,保障新疆棉花产业可持续发展,提高农田水分利用效率(WUE)是重要的节水途径之一。

另一方面,近年来国家大力推广机采棉技术,至2015年底,新疆兵团机采棉面积已占近70%,初步实现了兵团棉花的机械化采摘覆盖工作^[4]。为了适应采棉机要求,多种机采棉种植模式相继产生,国外机采棉主要采用单行等行距种植模式。新疆兵团根据积温少、无霜期短等气候特征,总结出以一膜六行(66 cm+10 cm宽窄行)、一膜四行(66 cm+10 cm宽窄行)、一膜四行(64 cm+

12 cm宽窄行)与一膜三行(76 cm+76 cm+76 cm等行距)等为代表的种植模式。然而,不同种植模式会改变灌溉制度、棉田养分积累、分配和运移等,继而对棉花生长产生不同程度的影响^[5-9]。上述4种植植模式可保证每株棉花获得的灌水量一致,但种植密度、株行距、覆膜宽度等都存在较大差异,这势必会影响棉田土壤生态环境和棉田微气候条件,从而引发棉花生长、产量问题以及棉田蒸腾、耗水、WUE等水资源利用问题。因此,很有必要对北疆常见机采棉种植模式下的棉花生长、产量、棉田WUE进行分析评价,这对优化新疆现有的机采棉种植模式,高效利用有限的农业水资源,实现棉花高产节水,保障新疆棉花产业的可持续发展具有现实意义^[8-11]。

此前,已有学者研究了棉花株行距配置、密度等对棉花产质量和品质的影响^[12-19]。如,蒋从军等^[17]认为机采棉宽窄行一膜六行(64 cm+

收稿日期:2020-04-22 **修回日期:**2020-07-15

基金项目:石河子大学高层次人才启动项目(RCZX201425);国家自然科学基金(31660135)。

第一作者:姜艳,女,副教授,硕士生导师,研究方向为森林生态碳水循环。E-mail:jiangyan098@shzu.edu.cn

通信作者:王鹏,男,硕士,副研究员,研究方向为作物育种。E-mail:125034325@qq.com

12 cm)与一膜三行等行距(76 cm + 76 cm + 76 cm)、一膜四行宽窄行(64 cm + 12 cm)相比,籽棉产量和皮棉产量均最高。廖凯等^[18]分析得出等行距棉花较宽窄行棉花种植密度低,但平均产量更高,品质更好。崔岳宁等^[19]对不同行距种植模式机采棉品质比较分析后认为,等行距76 cm模式下棉花各方面品质优于66 cm + 10 cm宽窄行棉花。可以看出已有研究大多只是针对单个种植模式对棉花产质量品质的影响进行分析。在棉田 WUE 方面,宁松瑞等^[16]曾对新疆棉花传统种植模式、机采模式及超宽膜模式下的水分利用效率和效益进行对比分析,认为超宽膜模式棉花的水分利用效率明显高于传统模式。然而有关新疆普遍推广的多种不同机采棉种植模式下棉田 WUE 的相关研究较为缺乏。为此,本试验以玛河流域 4 种典型机采棉种植模式为切入点,开展不同机采棉种植模式对棉株生长发育和产量形成影响的研究,试图总结不同模式下机采棉花的产量形成规律;同时对上述 4 种典型种植模式下的 WUE 进行对比分析,以期筛选出有利于提高新疆棉花产量和品质的节水高效机采棉种植模式,为新疆机采棉的推广与可持续发展提供理论支持。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

试验于 2017 年和 2018 年在新疆生产建设兵团农八师石河子总场进行。该区域位于荒漠绿洲过渡带,地处东经 85°50′~86°02′,北纬 44°18′~45°12′,海拔约 440 m,属典型的干旱荒漠区,主要土壤类型是灰漠壤土。无霜期 160~180 d,≥10℃积温 3 800℃,日照时数丰富,约 2 600~3 000 h。年均降雨量仅 200 mm 左右,年蒸发量 1 700~2 200 mm,且风沙频繁,水资源短缺。

1.2 试验设计

试验选择 4 种不同棉花种植模式,包括一膜三行(76 cm + 76 cm + 76 cm)等行距、一膜四行(64 cm + 12 cm)宽窄行、一膜四行(66 cm + 10 cm)宽窄行、一膜六行(66 cm + 10 cm)宽窄行,分别用 F3₍₇₆₎、F4₍₆₄₊₁₂₎、F4₍₆₆₊₁₀₎和 F6₍₆₆₊₁₀₎表示,不同种植模式下的多种株行距配置,具体如图 1 所示。

F3₍₇₆₎模式理论密度为 15.8 万株/hm²,覆膜宽度约为 2.05 m;F4₍₆₄₊₁₂₎模式理论密度为 18.5

万株/hm²,覆膜宽度约为 1.45 m;F4₍₆₆₊₁₀₎模式理论密度为 18.5 万株/hm²,覆膜宽度约为 1.45 m;F6₍₆₆₊₁₀₎理论密度为 23.7 万株/hm²,覆膜宽度约为 2.05 m。以上种植模式均采用一膜三管配置,株距均为 12 cm。全生育期滴水 10 次,6 月初灌头水,之后每隔 10 d 左右滴水 1 次,直至 8 月底停水。根据 4 种不同种植模式下的种植密度和灌溉定额,使单株棉花灌水量保持平均约 0.023 m³/株。整个生育期灌溉施肥同步。

1.3 测定指标及计算方法

1.3.1 株高和叶面积指数 在播种后 28、35、44、52、60、71、85、100 d,随机选取 10 株植株用卷尺测量棉花株高(cm),10 株平均值代表棉田株高。播种后 35、50、65、80、95、110 和 117 d 随机选取 5 株棉株采用 LAI-2000 冠层仪(Li-cor, USA)测定叶面积指数(Leaf area index, LAI)。

1.3.2 干物质质量 在播种后 35、50、65、80、95、110 和 130 d,不同生育阶段随机选取 5 株棉花,从茎干底部剪断去杂,在 105℃下杀青 30 min,80℃下烘干至恒质量,冷却称量即为单株棉花干物质质量(kg/hm²)。棉花群体干物质质量=棉花干物质质量均值×种植密度。

1.3.3 棉花产量及构成要素 棉花收获期,在每个种植模式的棉田正中间选取 1 个 2 m×3 m 的样方,在此样方内调查棉花总株数、铃数,算出单株铃数和单位面积总铃数等农艺性状。同时在各样方中随机选取 5~6 株长势均匀、具有代表性的棉株测量铃质量用来计算棉田籽棉产量。

1.3.4 收获指数 棉花收获指数(Harvest index, HI),是棉花经济产量占总生物产量的比值,是棉花高产的指标性因素。当 HI 较低时,即使棉株生物量高,最终产量也不会很高。为了更进一步明确不同种植模式下棉花产量问题,采用如下方法计算棉花 HI^[20]:

$$HI = \text{棉花籽棉产量} / \text{棉花地上干物质总量} \quad (1)$$

1.3.5 棉花耗水量 采用水量平衡法计算棉花全生育期耗水量,公式如下:

$$ET = P + U + I - R - D - \Delta S \quad (2)$$

式中,ET 为棉田耗水量(mm),P 为降水量(mm),U 为地下水补给量(mm),I 为灌水量(mm),R 为地表径流量(mm),D 为深层渗漏量,ΔS 为试验初期和末期土壤水分变化量(mm)。由于本试验区地势平坦、降雨稀少、蒸发强烈,地

下水埋藏较深,因此 U 、 R 和 D 可忽略不计,耗水量计算公式简化为:

$$ET = P + I - \Delta S \quad (3)$$

其中, $\Delta S = \varphi \times b \times h$ 。在棉花播种前和收获后,用土钻取土(0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm),烘干法测定土壤水分,取其平均值作为样地土壤含水率 $\varphi(\%)$; b 为土壤体积质量 (g/cm^3),

环刀法测定; h 为土层深度(mm)。

1.3.6 水分利用效率 水分利用效率按下式计算^[21]:

$$WUE = Y/ET \quad (4)$$

式中, WUE 为水分利用效率 ($\text{kg}/\text{hm}^2 \cdot \text{mm}$); Y 为单位面积籽棉产量 (kg/hm^2)。

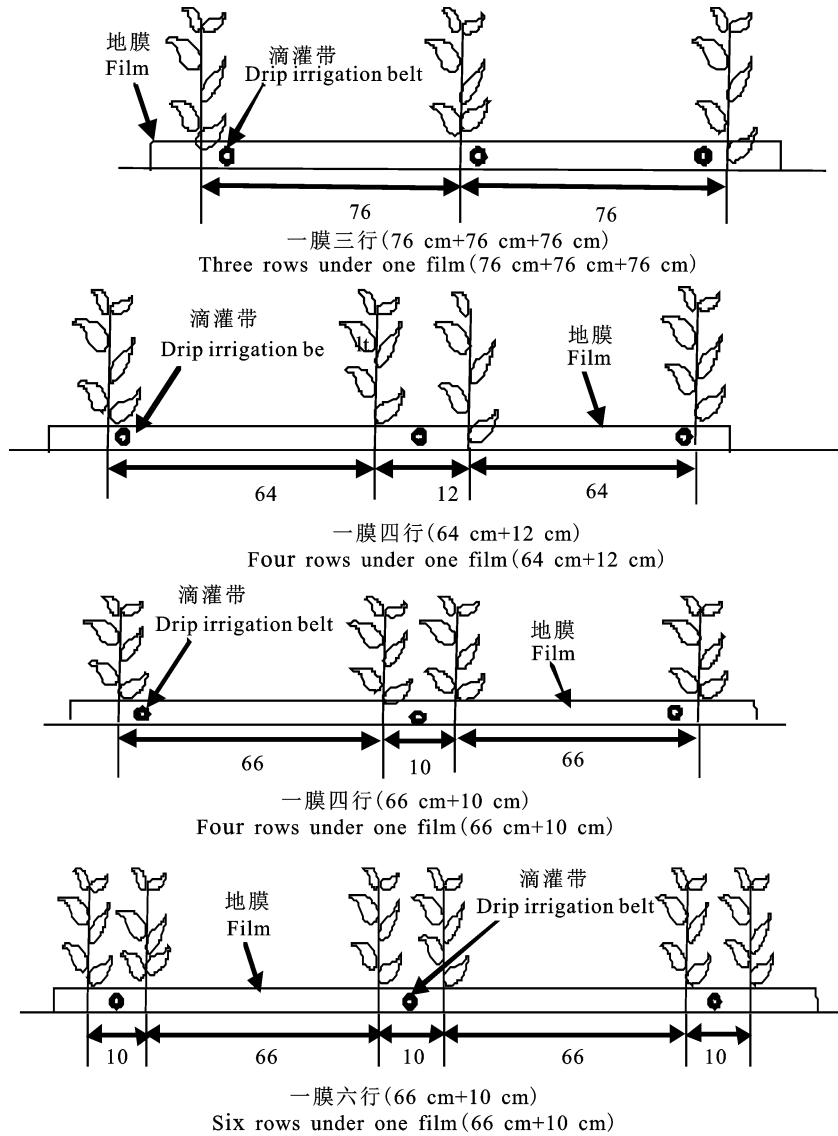


图 1 棉花不同种植模式示意图

Fig. 1 Different planting modes in cotton field

2 结果与分析

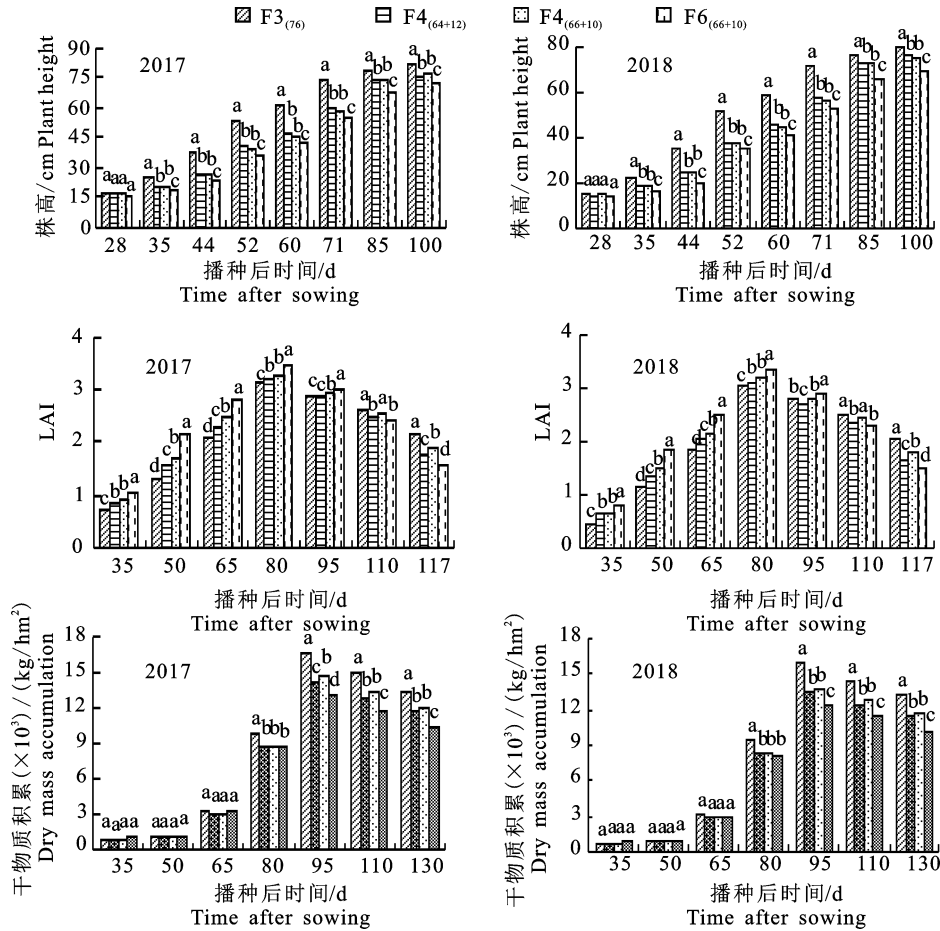
2.1 种植模式对棉花形态指标的影响

株高、LAI 和干物质积累量反映棉花不同时期的长势情况。由图 2 可知,棉花在播种后 35 d 左右,各模式间棉花株高、LAI 以及干物质积累量差异不明显 ($P > 0.05$),可能是因为棉花在苗期

生长较慢,导致种植模式的影响不显著。播种后 44 d 为棉花蕾期,不同种植模式下株高、LAI 和干物质积累量表现出一定的差异。其中种植模式 $F3_{(76)}$ 株高显著高于其他 3 种植模式, $F6_{(66+10)}$ 模式株高最小。播种后 71 d 棉花进入花铃期,株高增长速度减缓并趋于平稳,至播种后 100 d 时,株高相对播种后 85 d 平均仅增加 3.15 cm。

各种种植模式 LAI 随生育期的变化呈单峰曲线变化,均在花铃期(播种后 80 d)达到最大值,其中 $F_{6(66+10)}$ 模式显著大于其他种植模式 ($P < 0.05$),种植模式间 LAI 大小表现为: $F_{6(66+10)} > F_{4(66+10)} > F_{4(64+12)} > F_{3(76)}$,花铃期后 LAI 下降,但种植模式间下降幅度有所差异;至播种后 110 d 盛铃期,各种种植模式棉花 LAI 大小表现为:

$F_{3(76)} > F_{4(66+10)} > F_{4(64+12)} > F_{6(66+10)}$,可以看出在 2017-2018 两年观测期间, $F_{6(66+10)}$ 模式棉花的 LAI 下降最为剧烈,2 a 降幅达 30.7%~29.9%; $F_{3(76)}$ 模式下降最为平缓,2 a 仅下降 16.8%~17.7%; F_4 模式下两种不同宽窄行配置的 LAI 下降也较为平缓。



柱状图上方不同字母表示差异达显著性水平 ($P < 0.05$); 相同字母表示差异未达显著水平 ($P > 0.05$)

Different letters above bars indicate significant differences $P < 0.05$, the same letters indicate insignificant difference $P > 0.05$

图 2 不同种植模式棉花株高、叶面积指数及干物质质量动态变化

Fig. 2 Dynamic changes of plant height, leaf area index and dry mass accumulation under different planting modes

地上部棉花干物质质量从播种开始继续保持增长趋势,但总体趋势表现为营养生长阶段干物质积累较为缓慢(0~50 d),其中高密度 $F_{6(66+10)}$ 种植模式干物质质量最大,其次是 $F_{4(64+12)}$,然后是 $F_{4(66+10)}$, $F_{3(76)}$ 模式干物质质量最小, $F_{6(66+10)}$ 模式高于 $F_{3(76)}$ 模式约 10.43%~17.92%。进入生殖生长阶段(65 d),各模式干物质质量快速增加,其中 $F_{3(76)}$ 模式增加最快,超过 $F_{6(66+10)}$ 模式约 4.26%~5.38%;随着生育进程期的推移,各种种植模式间干物质质量逐渐显示出较大差异。干物质质量

峰值均出现在盛铃后期(95 d), $F_{3(76)}$ 模式显著大于其他模式 ($P < 0.05$);其次是 $F_{4(66+10)}$,与其他模式差异也达到显著水平 ($P < 0.05$); $F_{4(64+12)}$ 与 $F_{4(66+10)}$ 差异不显著; $F_{6(66+10)}$ 模式干物质最小。吐絮阶段(播种后 110 d)干物质质量开始下降,但 $F_{3(76)}$ 模式依然保持最大,且显著高于最小的 $F_{6(66+10)}$ 模式约 20.73%~23.20%。

2.2 种植模式对棉花产量构成因子的影响

由表 1 可以看出,低密度 $F_{3(76)}$ 模式下其株数和总铃数均显著小于其他模式 ($P < 0.05$),但

其株铃数和单铃质量显著大于其他模式 ($P < 0.05$); 而高密度 $F_{6(66+10)}$ 模式下株数和总铃数都是最多的, 且与其他模式差异达到显著水平 ($P < 0.05$), 但 $F_{6(66+10)}$ 模式下株铃数显著小于其他模式 ($P < 0.05$)。其中 $F_{3(76)}$ 模式株铃数比 $F_{6(66+10)}$ 高 58.6%~64.6%, 差异达极显著水平

($P < 0.01$); $F_{3(76)}$ 模式比 F_4 模式下的两种宽窄行配置也大 24.4%~26.1%, 差异达到显著水平 ($P < 0.05$)。 $F_{4(64+12)}$ 、 $F_{4(66+10)}$ 模式与 $F_{6(66+10)}$ 模式单铃质量的差异均没有达到显著水平 ($P > 0.05$)。

表 1 不同种植模式下棉花产量构成因子

Table 1 Components of cotton yield under different planting modes

种植模式 Planting modes	2017				2018			
	株数($\times 10^4$)/ hm^{-2} Plant No.	株铃数 Boll No. per plant	总铃数($\times 10^4$)/ hm^{-2} Total boll No.	单铃质量/ g Boll mass	株数($\times 10^4$)/ hm^{-2} Plant No.	株铃数 Boll No. per plant	总铃数($\times 10^4$)/ hm^{-2} Total boll No.	单铃质量/ g Boll mass
$F_{3(76)}$	10.3 c	11.1 a	114.3 c	6.10 a	10.1 c	10.7 a	108.1 c	6.08 a
$F_{4(64+12)}$	15.1 b	8.8 b	132.8 b	5.11 b	14.7 b	8.6 b	126.4 b	5.10 b
$F_{4(66+10)}$	14.8 b	8.8 b	130.2 b	5.25 b	14.5 b	8.5 b	123.3 b	5.16 b
$F_{6(66+10)}$	20.4 a	7.0 c	142.8 a	4.83 b	20.0 a	6.5 c	130.0 a	4.81 b

注:数据后不同字母表示在 0.05 水平上差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

Note: Different letters after data indicate significant difference at the 0.05 level ($P < 0.05$), the same below.

2.3 不同种植模式下籽棉产量和干物质质量及收获指数

不同种植模式对干物质质量的影响有所不同 (表 2), 在低密度 $F_{3(76)}$ 种植模式下干物质质量最大, 且与 $F_{4(64+12)}$ 与 $F_{4(66+10)}$ 和 $F_{6(66+10)}$ 模式差异

显著 ($P < 0.05$); 中等密度 F_4 种植模式下的两种株行距配置 $F_{4(64+12)}$ 与 $F_{4(66+10)}$ 之间干物质质量无显著差异, 但二者显著高于高密度 $F_{6(66+10)}$ 种植模式 ($P < 0.05$)。

表 2 不同种植模式下籽棉产量、干物质质量和收获指数 ($\bar{x} \pm s$)

Table 2 Seed cotton yield, dry mass accumulation and harvest index under different planting modes

种植模式 Planting modes	2017			2018		
	干物质质量/ (kg/hm^2) Dry mass	籽棉产量/ (kg/hm^2) Seed cotton yield	收获指数 Harvest index	干物质质量/ (kg/hm^2) Dry mass	籽棉产量/ (kg/hm^2) Seed cotton yield	收获指数 Harvest index
$F_{3(76)}$	14 600 \pm 101 a	7 190 \pm 110 a	0.49 a	14 392 \pm 111 b	6 990 \pm 120 a	0.49 a
$F_{4(64+12)}$	13 008 \pm 98 b	6 134 \pm 95 b	0.47 b	12 808 \pm 111 b	6 074 \pm 90 b	0.47 b
$F_{4(66+10)}$	13500 \pm 124 b	6 298 \pm 100 b	0.47 b	12 955 \pm 84 b	6 210 \pm 65 b	0.48 b
$F_{6(66+10)}$	12 890 \pm 17 c	5 815 \pm 70 c	0.45 c	12 174 \pm 72 c	5 601 \pm 70 c	0.46 c

种植模式对籽棉产量的影响显示, 在低密度 $F_{3(76)}$ 种植水平下, 2017、2018 连续两年均表现为 $F_{3(76)}$ 模式籽棉产量显著高于其他模式 ($P < 0.05$), 中等密度 $F_{4(64+12)}$ 、 $F_{4(66+10)}$ 模式与高密度 $F_{6(66+10)}$ 种植模式差异达到显著水平 ($P < 0.05$), 但 $F_{4(64+12)}$ 与 $F_{4(66+10)}$ 模式籽棉产量差异不显著 ($P > 0.05$)。各种种植模式对收获指数 HI 的影响表现为, $F_{3(76)}$ 模式 HI 最大, 为 0.49, 显著高于其他 3 种模式 ($P < 0.05$), $F_{6(66+10)}$ 模式 HI 最低, 2017 年和 2018 年分别为 0.45 和 0.46, 显著低于 $F_{3(76)}$ 模式和 F_4 模式 ($P < 0.05$), F_4 模式下的两种株行距差异不显著。

总体看来, 与其他种植模式相比, 高密度

$F_{6(66+10)}$ 种植模式虽然密度大, 但对棉花干物质积累量和籽棉产量均有显著下降 ($P < 0.05$), 说明株高、后期 LAI 偏小以及株铃数、单铃质量等影响到棉花干物质积累和籽棉产量, 高密度种植 $F_{6(66+10)}$ 不利于提高棉花产量。

2.4 不同种植模式对棉田总耗水量和水分利用效率的影响

4 种植模式下棉花总耗水量显示, $F_{3(76)}$ 、 $F_{6(66+10)}$ 模式用水量较大, F_4 模式用水量较小, 其中 $F_{3(76)}$ 、 $F_{6(66+10)}$ 模式比 F_4 模式耗水量减少约 4.41%~5.56%。方差分析显示, $F_{3(76)}$ 、 $F_{6(66+10)}$ 模式与 F_4 模式下的两种株行距配置耗水量差异达到显著水平 ($P < 0.05$)。WUE 分析表明 (表

3):低密度种植 F3₍₇₆₎ 模式下棉花具有最高的 WUE,中密度种植模式 F4₍₆₆₊₁₀₎ 次之,高密度种植模式 F6₍₆₆₊₁₀₎ 最低。其中,2017、2018 两年观测

结果均显示,F3₍₇₆₎ 模式与 F4₍₆₆₊₁₀₎ 模式的 WUE 差异不显著 ($P > 0.05$),但二者显著高于 F4₍₆₄₊₁₂₎ 和 F6₍₆₆₊₁₀₎ ($P < 0.05$)。

表 3 不同种植模式下耗水量和水分利用效率($\bar{x} \pm s$)

Table 3 Water consumption and water use efficiency under different planting modes

种植模式 Planting modes	2017		2018	
	总耗水量/mm Total water consumption	WUE/ [kg/(hm ² ·mm)]	总耗水量/mm Total water consumption	WUE/ [kg/(hm ² ·mm)]
F3 ₍₇₆₎	590±4.5 a	12.02±0.06 a	585±5.5 a	11.78±0.04 a
F4 ₍₆₄₊₁₂₎	564±6.2 b	11.59±0.02 b	566±6.7 b	11.26±0.07 b
F4 ₍₆₆₊₁₀₎	560±5.0 b	11.80±0.04 a	551±5.4 b	11.62±0.05 a
F6 ₍₆₆₊₁₀₎	593±4.9 a	10.14±0.01 c	588±5.2 a	9.87±0.04 c

3 讨论与结论

不同种植模式下棉花的株高基本呈现出比较一致的变化趋势。各生长发育阶段,低密度 F3₍₇₆₎ 模式下棉花株高处于最高水平,而高密度 F6₍₆₆₊₁₀₎ 模式的株高为最低,这与各模式间的种植密度有关。种植密度是影响棉花生长的主要因素之一,F3₍₇₆₎ 等行距低密度下,棉花株高优势明显,较宽窄行中密度 F4 及高密度 F6 模式分别高 23.8%、29.0%。株高与密度呈负相关,株高随群体密度增大而降低,在低密度条件下尤为明显,这与其他研究结论吻合^[22-23]。F6 宽窄行种植密度最大,棉田太阳辐射最弱,不利于棉花光合作用,因此该模式下棉花生长状况较差。因此,高密度 F6 模式株高偏低,不太利于机采。增加行距,降低种植密度可以有效增加株高,F3 和 F4 模式下株高便于机械采收。

各种种植模式干物质积累量在出苗~现蕾(0~50 d)期间,F6₍₆₆₊₁₀₎ 模式积累的干物质量最大,较 F3₍₇₆₎ 模式大约 10.43%~17.92%,较 F4₍₆₆₊₁₀₎ 大 6.14%~8.60%,较 F4₍₆₄₊₁₂₎ 大 6.72%~10.83%。可以看出,出苗~现蕾期间几种模式之间干物质量差别不大,这是因为前期棉株个体小,个体之间存在的竞争也较小,不同模式干物质量大小主要取决于种植密度,所以高密度 F6₍₆₆₊₁₀₎ 模式的干物质积累量最大,低密度 F3₍₇₆₎ 模式最小,F4 模式下的两种株行距没有明显差异。现蕾后(65 d 后),棉花进入营养生长与生殖生长并进阶段,随着棉花的生长,F3₍₇₆₎ 模式下干物质积累量急剧增加并超过 F6₍₆₆₊₁₀₎ 模式,最大超量达 23.2%,这是由于 F6₍₆₆₊₁₀₎ 模式虽然密度大,但是相对 F3₍₇₆₎ 行距较小,生长后期两行间棉株存在

对营养、水分、阳光等因素的竞争增强,最终导致 F6₍₆₆₊₁₀₎ 模式棉株长势势头较弱,干物质积累相对其他模式较少。

LAI 是反映作物群体光合性能的重要指标之一,适宜的 LAI 可以提高棉花产量^[24]。本研究显示 4 种植模式 LAI 均呈现先上升后下降的变化趋势,花铃期之前 LAI 随行距的减小而增大,至盛铃期达到最大,即 F3₍₇₆₎ 最小、F6₍₆₆₊₁₀₎ 最大。这是因为 F6₍₆₆₊₁₀₎ 模式为高密度种植,棉花群体优势大,生长发育前期 LAI 最大,而 F3₍₇₆₎ 模式在较大的等行距条件下,生育前期群体密度小、植株漏光损失大,光能利用率低,因此 LAI 增长速度相对较慢,F6₍₆₆₊₁₀₎ 模式密度大,棉花群体光能利用率高,LAI 增长最快。进入花铃期后,各模式 LAI 开始迅速降低,且行距越小,LAI 下降速率越快,即 F3₍₇₆₎ 最大,F6₍₆₆₊₁₀₎ 最小。这是因为随着生育时期的不断推进,F6₍₆₆₊₁₀₎ 模式群体密度过大,导致冠层环境恶化,棉株个体生长发育受阻,进而冠层中下部叶片加速衰老,LAI 降低,而 F3₍₇₆₎ 模式恰好相反。

棉花的产量与单位面积的棉株数、单株铃数、单铃质量等因素有关。本研究中,F3₍₇₆₎ 模式籽棉产量比 F6₍₆₆₊₁₀₎ 模式高 16.3%~17%,是因为虽然 F6₍₆₆₊₁₀₎ 模式密度最大,棉株数量多于 F3₍₇₆₎ 模式,但单株铃数 F3₍₇₆₎ 模式显著高于 F6₍₆₆₊₁₀₎ 模式约 36.9%~39.3%;单铃质量 F3₍₇₆₎ 模式比 F6₍₆₆₊₁₀₎ 模式质量约 20.8%,可能是低密度下株行距间光热资源合理分布,生态环境状态最好,最终促进了单株铃数及单铃质量的增加,弥补了低密度下群体较小、棉株数量少的劣势,说明总铃数和单铃质量是籽棉产量的决定性因素。除此之外,F3₍₇₆₎ 模式产量显著高于 F6₍₆₆₊₁₀₎ 模式也可能

是由于不同行距配置下棉花叶片的光合性能不同, $F3_{(76)}$ 模式较 $F6_{(66+10)}$ 模式, 更有利于棉株果枝的生长, $F3_{(76)}$ 模式下形成的棉株冠层结构较其他模式更有利于通风透光。因此, $F3_{(76)}$ 模式的棉行距配置为更有利于提高新疆机采棉产量的种植模式。而 $F4$ 模式下的两种株行距配置表现为 $F4_{(66+10)}$ 模式籽棉产量大于 $F4_{(64+12)}$ 模式, 这与前人研究结果一致, 即在密植条件下, 适当增大宽行与窄行的比值, 能从一定程度上改善棉田生长后期的通风透光性, 棉田不易荫蔽, 有利于个体的发育, 从而提高中下部棉铃质量^[25-26]。结合本试验可知, $F4_{(66+10)}$ 模式其宽窄行比值大于 $F4_{(64+12)}$ 模式, 导致 $F4_{(66+10)}$ 模式产量大于 $F4_{(64+12)}$ 。此外, 4 种植模式对棉花 HI 的影响表现为 $F3_{(76)}$ 模式 HI 最大, 显著高于其他 3 种植模式, $F6_{(66+10)}$ 模式 HI 最小, 这进一步说明机采棉 $F6_{(66+10)}$ 模式下棉花的经济效益最低。

4 种植模式下棉花 WUE 表现为 $F3_{(76)} > F4_{(66+10)} > F4_{(64+12)} > F6_{(66+10)}$, 其中 $F3_{(76)}$ 与 $F4_{(66+10)}$ 模式差异不显著 ($P > 0.05$), 但二者显著高于 $F4_{(64+12)}$ 和 $F6_{(66+10)}$ ($P < 0.05$), $F4_{(64+12)}$ 与 $F6_{(66+10)}$ 间差异也达到显著水平 ($P < 0.05$)。说明 $F3_{(76)}$ 模式下棉花群体的抗旱性最强, $F4$ 模式下的两种株行距配置棉田也有一定的抗旱性, 在缺水状态下, 这 3 种植模式均能适应干旱, 减小水分对棉花产量的危害。其中, $F6_{(66+10)}$ 模式 WUE 最低, 一方面是因为 $F6_{(66+10)}$ 模式下的窄行棉株间“争水争肥”现象严重; 另一方面从植物生长来说, 这可能是因为该模式下密度太大, 棉株叶片重叠程度重, 棉田小气候环境不利于棉株生长发育, 且有可能使地下根系生长空间受到限制, 造成棉株形态矮小, 整体产量较低。而与此同时该模式的高密度种植使得其单位面积耗水量最高, 从而导致水分利用效率最低。 $F4$ 模式下的两种株行距配置既保证了群体密度, 也保证了棉株宽窄行、株行距合理配置, 优化了整个棉田生态结构, 因此, 其棉花株高、干物质质量、叶面积等状况较好, WUE 较高。而 $F3_{(76)}$ 模式由于地膜较为宽, 其保墒作用可有效减少田间水分的散失, 导致单位面积耗水量最少, 同时该模式是低密度种植, 棉田环境更有利于棉花生长, 籽棉产量最大, 因此 WUE 最大。除此之外, 不同种植模式对棉花根区土壤水盐分布会有一定影响, 这也可能影响棉花生长和 WUE, 但相关结果仍有待进一步的

研究。

低密度 $F3_{(76)}$ 模式下最有利于棉花株高、干物质积累量和叶面积指数的提高, 从而提高棉花产量; 而高密度 $F6$ 模式下棉花各生长指标最不利于产量提高; $F4_{(66+10)}$ 和 $F4_{(64+12)}$ 适中, 其中 $F4_{(66+10)}$ 模式籽棉产量大于 $F4_{(64+12)}$ 模式。

水分利用效率 WUE 表现为 $F3_{(76)}$ 最大, $F6_{(66+10)}$ 最小; $F4$ 模式下的两种模式 WUE 为 $F4_{(66+10)} > F4_{(64+12)}$ 。因此, 认为北疆各机采棉种植模式下, $F3_{(76)}$ 模式棉花群体的抗旱性最强, $F4$ 两种株行距配置也有一定的抗旱性, 在棉田缺水状态下, 这 3 种植模式均能从一定程度上减轻水分对棉花产量的危害。而 $F6_{(66+10)}$ 模式虽然为现阶段推广面积较大的一种模式, 但其并不利于产量提高, 也不利于增强其抗旱性, 因此不是最优的种植模式。

不同种植模式影响棉花株行距配置及群体密度, 行距的过分窄小, 有可能使地下根系生长空间受到限制, 同时减少地上部分棉花个体间光热资源的分布, 从而导致棉田生长环境状况较差, 直接影响棉花生长、产量以及水分利用情况。建议北疆应对现有采棉机种植模式进行适当改进, 以实现同时提高棉花产量和 WUE, 增加种棉收益。

参考文献 Reference:

- [1] 梁亚军, 李雪源, 郑巨云, 等. 新疆 2019 年棉花产业情况概述及存在问题与策略[J]. 棉花科学, 2020, 42(1): 14-20.
LIANG Y J, LI X Y, ZHENG J Y, et al. Overview of cotton industry situation and existing problems and strategies in Xinjiang in 2019[J]. *Cotton Sciences*, 2020, 42(1): 14-20.
- [2] 杨鹏年, 董新光, 刘 磊, 等. 干旱区大田膜下滴灌土壤盐分运移与调控[J]. 农业工程学报, 2011, 27(12): 90-95.
YANG P N, DONG X G, LIU L, et al. Soil salt movement and regulation of drip irrigation under plastic film in arid area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(12): 90-95.
- [3] 李 源, 张 炎, 哈丽哈什·依巴提, 等. 腐植酸尿素施用量及不同配比对新疆膜下滴灌棉花产量及氮肥利用的影响[J]. 西北农业学报, 2019, 28(2): 191-197.
LI Y, ZHANG Y, HALIHASHI Yibat, et al. Effects of amount and ratio of humic acid urea on cotton yield and nitrogen use efficiency under drip irrigation [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2019, 28(2): 191-197.
- [4] 周亚立, 李生军, 闫向辉, 等. 兵团超宽膜植棉机械化技术及机具推广应用[J]. 新疆农机化, 2008(1): 24-25.
ZHOU Y L, LI SH J, YAN X H, et al. Mechanization technology and the application of the ultra wide film cotton in production and construction corp[J]. *Xinjiang Agricultural Mechanization*, 2008(1): 24-25.
- [5] 刘梅先, 杨劲松, 李晓明, 等. 滴灌模式对棉花根系分布和水

- 分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(增刊1): 98-105.
- LIU M X, YANG J S, LI X M, *et al.* Effects of drip irrigation strategy on cotton root distribution and water use efficiency[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(S1): 98-105.
- [6] ZHANG D, LUO Z, LIU S, *et al.* Effects of deficit irrigation and plant density on the growth, yield and fiber quality of irrigated cotton [J]. *Field Crops Research*, 2016, 197(10): 1-9.
- [7] ZHONG R, TIAN F, YANG P, *et al.* Planting and irrigation methods for cotton in Southern Xinjiang, China [J]. *Irrigation & Drainage*, 2016, 65(4): 461-468.
- [8] BEZBORODOV G A, SHADMANOV D K, MIRHASHIMOV R T, *et al.* Mulching and water quality effects on soil salinity and sodicity dynamics and cotton productivity in Central Asia[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2010, 138(1): 95-102.
- [9] 杨九刚, 马英杰, 马亮, 等. 滴灌带布设方式对棉田土壤盐分运移规律的影响研究[J]. 节水灌溉, 2012(5): 36-40.
- YANG J G, MA Y J, MA L, *et al.* Effect of drip irrigation tape disposition pattern on soil salinity migration in cotton fields[J]. *Water Saving Irrigation*, 2012(5): 36-40.
- [10] 蔡焕杰, 邵光成, 张振华. 棉花膜下滴灌毛管布置方式的试验研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(1): 45-48.
- CAI H J, SHAO G CH, ZHANG ZH H. Lateral layout of drip irrigation under plastic mulch for cotton[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2002, 18(1): 45-48.
- [11] LIU M X, YANG J S, LI X M, *et al.* Effects of irrigation water quality and drip tape arrangement on soil salinity, soil moisture distribution, and cotton yield (*Gossypium hirsutum* L. under mulched drip irrigation in Xinjiang, China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2012, 11(3): 502-511.
- [12] SHAKEEL A A, SALEEM M F, WANG L C, *et al.* 不同行距对陆地棉品种纤维品质性状的影响[J]. 棉花学报, 2010, 22(2): 181-185.
- SHAKEEL A A, SALEEM M F, WANG L C, *et al.* Varietal comparison of some fibre quality traits of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) under different row spacings [J]. *Cotton Science*, 2010, 22(2): 181-185.
- [13] 张晓洁, 王爱玉, 王志伟, 等. 不同采收时间棉花衣分和纤维品质的比较分析[J]. 山东农业科学, 2014, 46(8): 29-32.
- ZHANG X J, WANG A Y, WANG ZH W, *et al.* Comparative analysis on lint percent and fiber quality of cotton harvested at different time [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2014, 46(8): 29-32.
- [14] BALKCOM K S, PRICE A J, VAN S E, *et al.* Row spacing, tillage system, and herbicide technology affects cotton plant growth and yield [J]. *Field Crops Research*, 2010, 117(2): 219-225.
- [15] STEPENSON IV DO, BARBER L T, BOURLAND F M. Effect of twin-row planting pattern and plant density on cotton growth, yield, and fiber quality[J]. *Journal of Cotton Science*, 2011, 15(3): 243-250.
- [16] 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, ZUO Q, SHI J CH, *et al.* Water use efficiency and benefit for typical planting modes of drip-irrigated cotton under film in Xinjiang[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(22): 90-99.
- [17] 蒋从军, 王为然, 林涛, 等. 喀什地区不同种植模式对机采棉农艺性状及产量的影响[J]. 棉花科学, 2020, 42(1): 21-25.
- JIANG C J, WANG W R, LIN T, *et al.* Effects of different planting patterns on agronomic character and yield of machine-picked cotton in Kashi region[J]. *Cotton Sciences*, 2020, 42(1): 21-25.
- [18] 廖凯, 高振江, 孙巍, 等. 农艺条件对机采棉品质的影响分析[J]. 中国棉花, 2014, 41(11): 16-20.
- LIAO K, GAO ZH J, SUN W, *et al.* Analysis on the influence of agronomic conditions to machine-picked cotton quality[J]. *China Cotton*, 2014, 41(11): 16-20.
- [19] 崔岳宁, 高振江, 杨宝玲. 不同行距种植模式下机采棉品质比较分析[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(7): 235-240.
- CUI Y N, GAO ZH J, YANG B L. Quality analysis of different mechanical harvesting cotton planting patterns[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2016, 37(7): 235-240.
- [20] 谢光辉, 韩东倩, 王晓玉, 等. 中国禾谷类大田作物收获指数和秸秆系数[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(1): 1-8.
- XIE G H, HAN D Q, WANG X Y, *et al.* Harvest index and residue factor of cereal crops in China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2011, 16(1): 1-8.
- [21] 邓忠, 白丹, 翟国亮, 等. 膜下滴灌水氮调控对新疆棉花产量及水氮利用率的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(9): 2525-2532.
- DENG ZH, BAI D, ZHAI G L, *et al.* Effects of water and nitrogen regulation on the yield and water and nitrogen use efficiency of cotton in south Xinjiang, Northwest China under plastic mulched drip irrigation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(9): 2525-2532.
- [22] 李建峰, 梁福斌, 陈厚川, 等. 棉花机采模式下株行距配置对农艺性状及产量的影响[J]. 新疆农业科学, 2016, 53(8): 1390-1396.
- LI J F, LIANG F B, CHEN H CH, *et al.* Effect of plant and row spacing on agronomic characters and yield of machine-picked cotton[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2016, 53(8): 1390-1396.
- [23] 陈超, 潘学标, 张立桢. 种植密度对棉花产量构成、成铃和棉铃性状分布的影响[J]. 中国棉花, 2012, 39(1): 31-36.
- CHEN CH, PAN X B, ZHANG L ZH. Effects of planting density on yield components, boll and boll character distribution in cotton[J]. *China Cotton*, 2012, 39(1): 31-36.
- [24] SINHA S K, PADALIA H, DASGVPTA A, *et al.* Estima-

- tion of leaf area index using PROSAIL based LUT inversion, MLRAGPR and empirical models: Case study of tropical deciduous forest plantation North India[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 2020, 86: 102027.
- [25] 李建峰,王聪梁,福斌陈,等. 新疆机采模式下棉花株行距配置对冠层结构指标及产量的影响[J]. 棉花学报, 2017, 29(2): 157-165.
- LI J F, WANG C L, FU B CH, *et al.* Row spacing and planting density affect canopy structure and yield in machine-picked cotton in Xinjiang[J]. *Cotton Science*, 2017, 29(2): 157-165.
- [26] 高云光,饶翠婷,贺海燕,等. 铃期温度对不同棉花品种棉铃发育过程及纤维比强度的影响[J]. 棉花学报, 2010, 22(6): 580-585.
- GAO Y G, RAO C T, HE H Y, *et al.* Regulation effect of temperature on the boll dates for boll development and fibre strength[J]. *Cotton Science*, 2010, 22(6): 580-585.

Effects of Planting Modes on Machine-picked Cotton Growth and Water Use Efficiency

JIANG Yan¹, WANG Peng², XU Fei³ and LIU Dongyang¹

(1. Department of Resources and Environmental Sciences, College of Agronomy, Shihezi University, Shihezi 832000, China;

2. Institute of Crop Sciences, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Shihezi Xinjiang 832000, China;

3. Fruit Industry Co. Ltd of Xinjiang Production and Construction Corps, Urumqi 830001, China)

Abstract To explore the effects of different planting modes on cotton development, yield and water use efficiency in the field, four planting modes including three rows covered with one film (76 cm+76 cm+76 cm), four rows (64 cm+12 cm) three rows covered with one film, four rows covered with one film (66 cm+10 cm) and six rows covered with one film (66 cm+10 cm) (denoted by F₃₍₇₆₎, F₄₍₆₄₊₁₂₎, F₄₍₆₆₊₁₀₎ and F₆₍₆₆₊₁₀₎ respectively) were set in growth season of Shihezi during years of 2017 and 2018. The effects of different planting modes on plant height, leaf area index (LAI), dry mass accumulation, yield components and water use efficiency (WUE) were analysed. The results showed that the low density F₃₍₇₆₎ mode contributed to highest plant height, dry mass accumulation, LAI and yield among all planting modes; while, the high density F₆₍₆₆₊₁₀₎ mode obtained lowest plant height, dry mass accumulation, LAI and yield; F₄₍₆₆₊₁₀₎ and F₄₍₆₄₊₁₂₎ modes had moderate effect on cotton growth and yield, and the seed cotton yield of F₄₍₆₆₊₁₀₎ model was greater than that of the F₄₍₆₄₊₁₂₎ mode. F₃₍₇₆₎ had the highest WUE, while it was the minimum in F₆₍₆₆₊₁₀₎; the difference of WUE between F₄₍₆₄₊₁₂₎ and F₄₍₆₆₊₁₀₎ was not significant. Considering the water shortage in the Northern Xinjiang, F₃₍₇₆₎ was suggested to be optimal mode for higher cotton production and WUE. Besides, the cotton population had the strongest drought resistance under F₃₍₇₆₎ mode, followed by F₄₍₆₆₊₁₀₎ and F₄₍₆₄₊₁₂₎ modes. While F₆₍₆₆₊₁₀₎ had neither good production, nor better drought resistance. The study can provide valuable data for improving management of machine-picked cotton in Northern Xinjiang.

Key words Machine-picked cotton; Planting mode; Water; Seed cotton yield; Morphological index

Received 2020-04-22

Returned 2020-07-15

Foundation item High-level Talents Startup Project of Shihezi University (No. RCZX201425); the National Natural Science Foundation of China (No. 31660135).

First author JIANG Yan, female, associate professor, master supervisor. Research area: ecosystem carbon and water cycle. E-mail: jiangyan098@shzu.edu.cn

Corresponding author WANG Peng, male, master, associate research fellow. Research area: plant breeding. E-mail: 125034325@qq.com