

边行效应对间作棉花生理性状及产量的影响

艾鹏睿, 马英杰, 海英

(新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆乌鲁木齐 830052)

摘要: 为探究边行效应对间作棉花生理发育的影响,采用大田试验方法,通过对间作棉花设置充分和水分亏缺两种灌溉方式,分析4行间作棉花的生理指标及作物产量受影响程度,其中靠近枣树的棉花命名为D1行,而后依次命名D2、D3、D4行。结果表明:在充分灌溉条件下,间作棉花生理指标和作物产量均显著高于单作模式,间作种植利于棉花生长发育,即使在水分亏缺条件下,作物产量仍提升2.53%。间作模式可改变土壤水分空间分布,引发种间竞争与互补。在4行棉花中D1行棉花明显受到枣树种间竞争和遮阴效果的影响,其生理指标和作物产量微低于D2行,但仍高于单作模式。D2行棉花在4行棉花中长势最好,净光合速率最大,作物产量最高。D3、D4行棉花距树较远,又受种内竞争限制,生理指标仅微高于单作。此外,单间作棉花SPAD值无显著差异,表明果树遮阴对棉花叶绿素影响较弱。对间作棉花施加水分亏缺后,D1、D2行棉花受影响较小,甚至植株生理指标和作物产量有少许提高。D3、D4行棉花株高和叶面积指数分别减少20.69%、4.89%,作物产量减少11%左右。因此间作模式会引发强烈的边行效应,造成4排棉花生理性状存在显著差异,其中越靠近枣树,受影响程度越高,抵御水分胁迫能力越强,但也易受到种间竞争和枣树遮阴效果的影响。

关键词: 棉花; 间作模式; 边行效应; 生理指标; 作物产量

中图分类号: S562; S665.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)04-0138-07

Influence of marginal effect on physiological characters and yields of intercropping cotton

AI Pengrui, MA Yingjie, HAI Ying

(College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: To explore the effect of marginal effect on physiological development of intercropping cotton, we used sufficient irrigation and deficit irrigation to analyze the physiological indexes and crop yields of four-row intercropping cotton. The cotton near the jujube trees is named as Row D1, and other rows as Row D2, D3 and D4, respectively. The results showed that under sufficient irrigation conditions, the physiological indexes and crop yields of intercropping cotton were significantly higher than those of single cropping, and intercropping was beneficial to cotton growth and development. Even under water deficit conditions, crop yields still increased by 2.53%, because the intercropping changed the spatial distribution of soil moisture, triggering interspecific competition and complementary mechanisms. Among the four rows of cotton, cotton of Row D1 was obviously affected by the competition with the jujube trees and the shading effect. Its physiological indicators and crop yield were slightly lower than Row D2, but still higher than the single cropping. The cotton growth of Row D2 was the best among the four rows, with the largest net photosynthetic rate and the highest crop yield. Because Row D3 and D4 were far away from the trees, which were restricted by intra-species competition, so the physiological indicators were only slightly higher than single cropping. However, there was no significant difference in the SPAD of singlecropping cotton, indicating that the shading of the jujube trees had a weak effect on cotton chlorophyll. After ap-

收稿日期:2020-06-11; 修回日期:2020-07-08

基金项目:新疆维吾尔自治区高校科研计划项目(XJEDU2017T004); 2019年度新疆农业大学研究生科研创新项目(XJAUGRI2019003); 2019年研究生“水利工程”重点学科研究项目(SLXK-YJS-2019-01)

作者简介:艾鹏睿(1992-),男,吉林辽源人,博士研究生,主要从事灌溉节水理论研究。

通讯作者:马英杰(1969-),男,河北保定人,博士,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉生态教学和科研工作。

plying water deficit in the intercropping cotton, Row D1 and D2 were less affected, and the plant physiological indicators and crop yields even increased slightly. The plant height and leaf area index of Row D3 and D4 decreased by 20.69% and 4.89% respectively, and the crop yield reduced by about 11%. Therefore, the intercropping will cause a strong marginal effect, resulting in significant differences in the physiological characteristics of the four rows of cotton. The closer to the jujube trees, the higher the impact degree and the stronger the ability of water stress resistance of the cotton, but it is also susceptible to interspecies competition and the shading effect of jujube trees.

Key words: cotton; intercropping pattern; marginal effect; physiological index; crop yield

1 研究背景

间作是我国传统农业种植模式的重要组成部分,该模式可更高效地在时间上和空间利用水、光、热、肥等农业资源,改善田间小气候^[1],调节果实品质^[2],提高农业经济效益^[3],因而发展前景巨大。特别是在南疆地区特色林果业的不断发展的前提下,果农间作模式已成为该地区种植结构转型的重要桥梁。以棉花为代表的农作物的单作模式正逐渐被果农间作模式所取代。采用果农间作不仅能够较好地解决农业资料有限所引发的耕地划分和果树初期经济效益低下的问题,又能保证棉花种植业的农业地位^[4],因此具有很高的推广价值。

针对枣棉间作,前人研究均表明种间互补对棉花生理发育效果显著^[5]。如段志平等^[6]发现在间作模式中适当增加棉花种植密度有利于棉花高产。李发永等^[7]研究表明,间作棉花的株高和干物质量均显著高于单作模式,棉花在间作体系中占主导地位。此外,有部分研究提出间作作物产量优势主要源于间作系统中各边行优势的累加效应^[8]。如秀洪学等^[9]研究表明,大蒜间作系统的边行蚕豆根瘤量比中行高80.06%。孙守家等^[10]研究表明,果农间作模式中的小麦根系在水平方向上呈“两边多,中间少”的分布趋势。

因此认为间作棉花由于边行和内行所处的环境条件不同,必然会导致边行优势,并与内行出现差异。然而过去针对果农间作的研究常把果树行间农作物看成一个整体,很少探究边行优势对作物生理特性及产量的影响。

为此,本试验在前人研究的基础上,对间作棉花在充分灌溉和水分亏缺条件下边行效应进行研究。探究间作棉花不同边行之间的产量及植株生理生态的差异,以便更好地开发利用边行优势效应、建立合理的田间配置、保证间作效益的最大化及实现作物稳产高产。

2 材料与方法

2.1 研究区概况

试验区位于新疆阿克苏地区新疆农业大学林果试验基地(80°14'E,41°16'N,海拔1133 m)。该地区属于大陆性干旱气候,降雨量稀少,气候干燥,多年平均降水量仅为74.4 mm,主要集中在4月中旬和8月上旬。多年平均太阳总辐射量为544.115~590.156 kJ/cm²,无霜期达205~219 d。初始土壤质地0~40 cm以粉砂壤土为主,40~60 cm以壤砂土为主,60 cm以下以细沙土为主。该地区地下水埋藏深度较深,因此不考虑地下水补给问题。

2.2 试验设计

间作系统作物选用6 a 生长势均匀灰枣和新陆中49号棉花。枣树株距1 m,行距4 m。棉花株距8 cm,行距20~40~20 cm,具体种植模式如图1所示。试验共设3个处理,分别为(1)Z2M2,即枣树和棉花均充分灌溉;(2)Z2M1,即枣树充分灌溉,棉花灌溉量减少50%;(3)M2,即棉花单作。每个处理设3个重复。各处理灌溉制度采用P-M公式指导灌溉,灌水周期为7 d,灌溉量根据前一灌水周期累积蒸发蒸腾量确定。枣树作物系数参考文献[11],棉花作物系数参考文献^[12-13]。各生育期灌溉制度如表1所示。施肥及作物管理依当地实际情况进行。

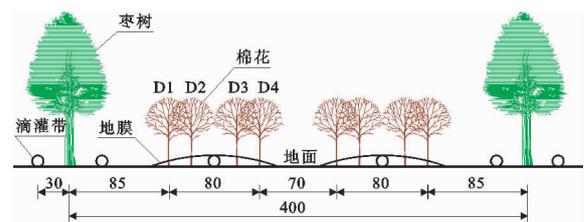


图1 枣棉间作试验种植模式示意图(单位:cm)

2.3 样品采集与测试方法

2.3.1 棉花株高、叶面积指数、SPAD值测定 在棉花苗期、蕾期、花铃期、吐絮期、收获期每个行向选择8株长势均匀的棉花,采用米尺测定株高,手持式

SPAD-502 叶绿素仪测定 SPAD 值。同时选取 3 株棉花采用万深 LA-S 仪器测定叶面积。

2.3.2 棉花叶片净光合速率 于棉花苗期、蕾期、花铃期、吐絮期,采用 CIRAS-3 光合测定系统测定棉花叶片净光合速率。每个行向均选取 3 株棉花,选择顶端倒 3 片发育完全的叶片进行测定。测定时间为 12:00 前后。

2.3.3 土壤水分测定 于棉花花铃期采用 TRIME-IPH 测定土壤含水率。间作模式 TRIME 测定位置为行间距枣树 25、50、75、100、125、150、175、200 cm 处。单作棉花 TRIME 测定位置为滴灌带下方和距滴灌带 30、75 cm 处。

2.3.4 棉花产量及其相关构成因素 全生育期结束后,分别按行向在各个重复收取 30 m 长度的棉花产量进行测产。用于计算各行向棉花实际产量。

表 1 枣棉间作试验各生育期灌溉制度设计

枣树		棉花	
生育阶段	灌水定额/mm	生育阶段	灌水定额/mm
春灌	40	春灌	75
萌芽展叶期	52	苗期	0
花期	217	蕾期	128
幼果期	52	花期	84
果实膨大期	110	铃期	98
成熟期	0	吐絮期	30
合计	471	合计	415

注:Z2M2 处理为枣棉间作,枣树、棉花灌溉定额如表;Z2M1 处理为枣棉间作,枣树灌溉定额不变,棉花减少 50%;M2 处理为棉花单作,枣树灌溉定额如表。

3 结果与分析

3.1 间作棉花根区土壤水分空间分布

土壤水分空间分布可以真实反映枣棉间作土壤水分运移现状,图 2 为 8 月 8 日间作棉花根区土壤含水量空间分布情况。由图 2(a)可以看出,在充分灌溉条件下(Z2M2 处理),枣树和棉花滴灌带下方为水分最为丰富区域,而后通过土壤水分运移向周围扩散。以棉花滴灌带下方 100 cm 为界限,靠近枣树方向的土壤水分明显高于外侧棉花根区土壤水分,这为内行棉花生长发育提供了良好的基础。由图 2(b)可以看出,当对棉花施加水分亏缺后(Z2M1 处理),该空间土壤水分含量整体减小,但是同样呈现出靠近枣树部土壤水分高于外行棉花的情况。因此,枣树和棉花根区土壤水分交互作物使 100 cm 内

侧 2 行棉花根区土壤水分一定高于外侧两行棉花根区土壤水分。这也为缓解施加在间作棉花上水分亏缺提供了可能。

3.2 单间作棉花净光合速率变化规律

净光合速率是表征作物光合能力的重要参数,其数值越大,作物在单位时间合成有机物越多。图 3 为在不同生育期分别测定的单、间作模式各处理下棉花净光合速率变化情况。由图 3 可以看出,间作棉花净光合速率在各个生育期均高于单作模式,全生育高约 10.11%。尤其在苗期和花铃期,两者差幅分别为 39.17% 和 13.32%。当对间作棉花施加水分亏缺后,棉花净光合速率略有下降,但下降幅度仅为 4.12~10.73%。因此,在全生育期间作棉花光合产物累积量显著高于单作模式。

对比不同行向棉花净光合速率进行分析。在苗期棉花受枣树叶片遮蔽效果弱,D1 行受影响较小,净光合速率呈现靠树越近,数值越高的现象。至蕾期、花铃期时,枣树对 D1 行遮蔽效果加剧,棉花叶片净光合速率下降幅度显著。D2 行受影响程度较弱,但由于靠近枣树,受种间互补效果和土壤水分含量增加效果明显,净光合速率为所有行中最大值。至吐絮期时(枣树和棉花均停止灌溉),D1 与 D2 行净光合速率趋差幅缩减,说明种间互补效果开始减弱,根区土壤水分对植株加持效果同样也在减弱。因此,在全生育期中,边行效应对棉花净光合速率的影响始终存在,主要增幅在 D1、D2 行棉花,而 D3、D4 行棉花距树较远,增幅效果微弱。该结果也在对间作棉花施加水分亏缺后,D1、D2 行棉花净光合速率受影响较小,而 D3、D4 行棉花净光合速率明显减小上体现出来。

3.3 单、间作棉花生理指标变化规律

单、间作模式各处理下棉花生理指标变化规律如表 2 所示。由表 2 可以看出,种间互补使间作棉花生理发育良好。相比单作模式,间作棉花株高、叶面积指数分别提高 18.87% 和 12.21%。单、间作模式 SPAD 值差幅较小,仅为 3.78%。当对间作棉花施加水分亏缺后,株高和 SPAD 值仅下降 7.68% 和 8.70%,而叶面积指数基本无变化。说明间作模式抵御外界环境变化有很好的容错性。

从不同行向棉花生理指标变化情况可以看出,在单作模式中,靠近滴灌带两行棉花生理指标微有提升,但在方差分析中,差异不显著。而在间作模式中,边行效应对棉花生理指标影响显著。受种间互补影响,除 D1 行外,棉花株高和叶面积指数呈现距

枣树越近,增幅效果越明显。D2 行为所有行中最高值,相比单作模式,株高和叶面积指数分别提高 27.44% 和 20.73%。D4 行为所有行中最低值,但仍比单作模式有小幅提高。D1 行距离枣树较近,受到种间竞争和枣树遮阴效果的影响使植株生理指标出现一定下降。*SPAD* 值在不同行向中差异不显著,说明离树间距和果树遮阴对棉花叶片叶绿素含量影响较弱。

当对间作棉花施加水分亏缺后,各行向棉花植株生理指标均出现下降。与单作相比,D1 行和 D2 行受影响程度较小,甚至 D2 行仍有小幅提升。而 D3、D4 行棉花明显受到水分亏缺的影响,生理指标下降幅度明显。尤其是 D4 行,株高、叶面积指数、*SPAD* 值分别减少 27.73%、10.49%、22.84%。因此间作棉花在抵御外界影响时,总体呈现越靠近枣树,抵御能力越强。

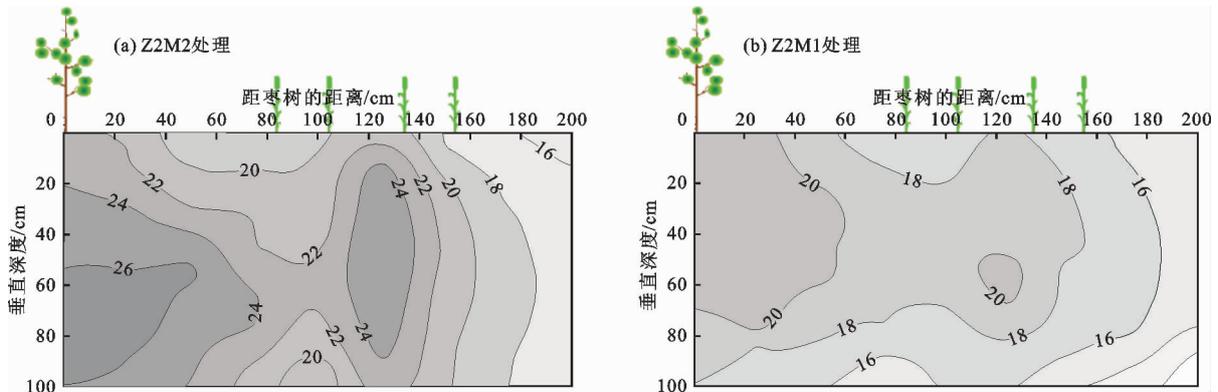


图 2 间作棉花试验土壤含水量空间分布情况(8月8日,单位:%)

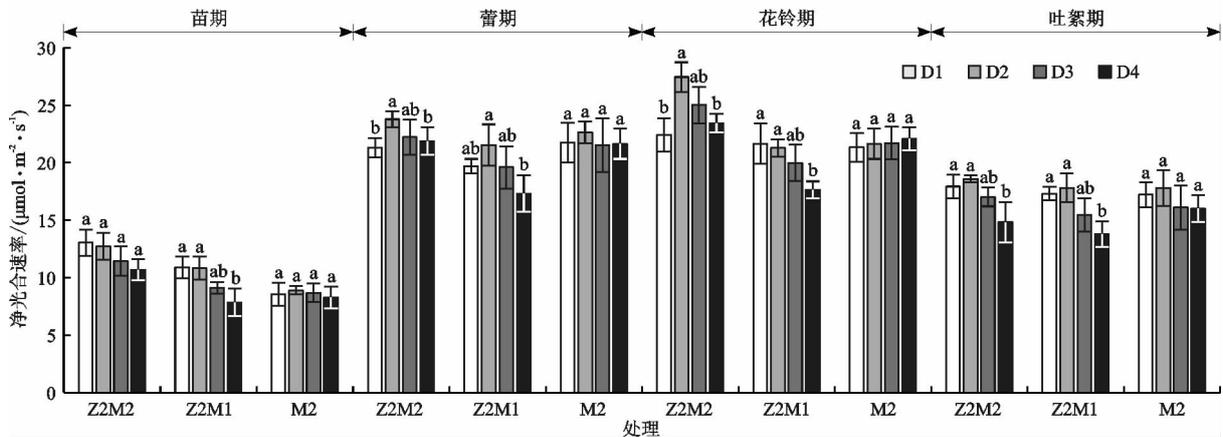


图 3 单、间作模式各处理下棉花不同生育期净光合速率

表 2 单、间作模式各处理下棉花生理指标变化规律

距树位置	Z2M2 处理			Z2M1 处理			M2 处理		
	株高/cm	叶面积指数	<i>SPAD</i>	株高/cm	叶面积指数	<i>SPAD</i>	株高/cm	叶面积指数	<i>SPAD</i>
D1	84.49 ± 1.59 ^b	3.59 ± 0.12 ^{bc}	63.49 ± 3.11 ^a	71.57 ± 1.86 ^b	3.51 ± 0.11 ^{ab}	62.34 ± 1.38 ^a	68.10 ± 1.93 ^b	3.21 ± 0.09 ^a	61.63 ± 2.22 ^a
D2	93.14 ± 4.11 ^a	4.08 ± 0.18 ^a	63.36 ± 3.93 ^a	76.97 ± 1.90 ^a	3.55 ± 0.10 ^a	60.65 ± 1.08 ^a	73.08 ± 1.99 ^a	3.37 ± 0.07 ^a	60.20 ± 1.13 ^a
D3	83.99 ± 2.20 ^b	3.69 ± 0.12 ^b	63.79 ± 2.07 ^a	62.19 ± 2.71 ^c	3.33 ± 0.04 ^b	53.35 ± 1.92 ^b	72.02 ± 1.44 ^{ab}	3.30 ± 0.15 ^a	61.94 ± 1.30 ^a
D4	74.10 ± 2.83 ^c	3.38 ± 0.15 ^c	62.90 ± 2.82 ^a	50.03 ± 1.92 ^d	2.90 ± 0.09 ^c	46.71 ± 2.75 ^c	69.22 ± 1.82 ^{ab}	3.24 ± 0.06 ^a	60.53 ± 2.40 ^a

3.4 边行效应对间作棉花产量的影响

单、间作模式各处理下棉花作物产量变化规律如表 3 所示。由表 3 可以看出,间作棉花作物产量在不同行向均显著高于单作模式,平均高于单作模

式 20.33%。当对间作棉花施加水分亏缺后,间作棉花减产 14.79%,但仍高于单作模式 2.53%。由此可以看出,间作棉花种间互补效果增幅明显,作物产量有较大提升。此外,间作模式可以促使棉花增

加抵御外界因素变化的能力,进而确保自身产量不受影响。对比不同行向棉花作物产量,由表2还可以看出,间作棉花在不同行向作物产量差异明显,其中D2行棉花作物产量最高,高于单作模式36.55%,其次为D1行,高于单作模式21.18%。而D3、D4行受种间互补增幅效果较弱,增产约为12%。当进行水分亏缺后,D1、D2行由于靠近枣树,受到枣树水分补给,施加给棉花的水分亏缺对其影响较弱,进而仍呈现增产效果。相比单作模式,增产约16%左右。而D3、D4行则无法摆脱水分亏缺的影响,尤其是D4行,相比单作模式,减产16.90%。

表3 单、间作模式各处理下棉花作物产量变化规律

处理	kg/hm ²		
	Z2M2 处理	Z2M1 处理	M2 处理
D1	3411.19 ± 56.92b	3209.60 ± 122.24a	2815.03 ± 77.29a
D2	3698.77 ± 125.86a	3209.36 ± 126.35a	2708.72 ± 83.10a
D3	3128.02 ± 64.82c	2684.41 ± 131.23b	2835.81 ± 93.98a
D4	3115.01 ± 95.05c	2274.58 ± 168.46c	2737.17 ± 132.63a

4 讨论

水分是影响植物光合作用和生理发育的重要因素。水分亏缺必然限制作物光合速率和植物生理发育^[14-15]。在间作体系中,土壤水分在灌溉后受种间竞争和土壤水分运移的影响出现了再分配现象^[16]。作物光合速率和生理发育将出现适应性调整。在本研究中,受灌溉配置的影响,间作棉花根部土壤水分呈现明显的空间分布不均现象,即越靠近枣树,土壤水分含量越高。而在棉花外行,土壤水分含量逐渐减少。尤其是对间作棉花施加水分亏缺后,这种现象更加明显。受土壤水分空间分布不均的影响,间作棉花地上部分出现了适应性的变化,在枣树对棉花的影响较小的情况下(棉花苗期),间作棉花净光合速率呈现出距枣树越近,净光合速率越大的现象。但随着枣树和棉花的不断生长发育,间作棉花所处光环境受到影响。而光环境是作物冠层光合作用直接能量来源,它不仅直接影响作物的蒸腾和光合作用,而且影响作物的生长发育进程^[17]。在农林间作模式中,木本植物冠幅必然会对光照产生遮蔽效果,从而抑制农作物冠层光合速率^[18]。在本研究中D1行过于靠近枣树,光合速率受到一定的抑制,这与李发永等^[7]研究结果相似。但D2、D3、D4行距枣树较远,受遮蔽效果较弱,其光合速率相对单作模

式,反而有一定程度的提升。因此距树间距也是影响边行效应的重要因素。而对于间作枣树,土壤水分的再分配现象易影响枣树生理发育。如杨涛等^[19]研究表明间作可使枣树作物产量减少,但土地利用总体提高35%。

作物生长是一个由植物体内叶绿素将光能转化为化学能,进而积累光合产物的过程^[20]。屈洋等^[21]研究表明边行叶绿素含量大于中行,不同行向间叶绿素含量存在显著差异。但在本研究中,4行棉花SPAD值无明显差异,仅与水分亏缺关联度较高。这与段志平等^[20]对小麦SPAD值研究结果一致。分析认为树木遮阴会对农作物产生影响,当农作物距树间距达到一定距离后,即使果树对农作物产生遮阴效果,但遮阴时间较少,对农作物叶片叶绿素影响程度有限。吕瑞洲等^[22]研究表明距果树农间作模式会导致农作物生理发育整体受到限制。而孙守家等^[10]对果农间作中小麦根系的研究发现,果树与麦子行间距可为麦子根系生长发育预留生态位。王婷等^[23]研究表明,棉花对枣树的竞争作用占绝对优势,且间作棉花根系量显著高于单作模式。因此,在靠近枣树时,间作棉花在受到种间竞争的影响的同时,又受预留生态位的影响,内行株高和叶面积指数显著提升。但外行棉花仅受少部分水分补给和间作模式改善农田小气候的影响,增幅效果较弱。最终表现出明显的边行效应。即过于靠近枣树时,植株生长量下降幅度明显,却仍高于单作模式,其他行呈现出距枣树越近,植株生长越好。当施加水分亏缺后,内行棉花受到水分的影响,会与枣树进行水分掠夺,维持自身生长发育。又因为在枣棉间作体系中,棉花占主要优势,所以即使施加水分亏缺,也对内行棉花影响较小。而外行棉花距离枣树较远,又受到种内竞争的压制,仅能吸收自身根区土壤水分,呈现出株高、叶面积指数和SPAD值显著下降的情况。此外,棉花叶面积指数和株高的提升有助于冠层结构限制水分散失,延缓土壤蒸发水分散失,提升冠层部空气湿度,促使作物生长发育^[24]。树木也可以产生一种林带效应,减弱风速和乱流交换,延长植物蒸腾和土壤蒸发水分在近地表的滞留时间^[25],同样也对作物生长发育有着明显的增幅。因此,在采用间作模式后,农田小气候会变得更加适宜作物生长,进而促进棉花净光合速率、株高和叶面积指数提升,最终作用于作物产量。

光合作用积累有机物直接影响作物生理指标,最终影响作物产量的增减。在枣棉间作中,虽然果

树会对棉花采光造成一定影响^[26],但种间互补使光合速率有较大幅度的提升,光合产物累积对作物产量的提高有明显的促进作用。因此,在本试验中,间作棉花受生理指标显著提升的影响,作物产量增加20.33%。但对各行向作物产量进行对比后发现,其作物产量的增加主要依靠D1、D2行,而D3、D4行增产效果微弱。因此强烈的边行效应使作物产量重新分配,而非同等提升。此外,大量研究均表明水分亏缺可使作物出现响应的减产^[27-28]。在本研究中,对间作棉花施加水分亏缺后,作物产量仍高于单作模式2.53%。这表明间作棉花具有很好的抵御外部环境变化的特性。对每行棉花作物产量对比后发现,种间互补多侧重于靠近枣树行,而非所有棉花。其中D3、D4行间作棉花依然减产16%左右。

5 结 论

(1)种间互补对间作棉花生理指标变化影响显著。与单作模式相比,间作棉花株高、叶面积指数和净光合速率分别提高18.87%、12.21%和10.11%。而SPAD值变化较小,仅提高3.78%。当对间作棉花施加水分亏缺后,虽然植株生理指标略有下降,但作物产量与单作模式相比仍有小幅增加。说明间作棉花对外界不利情况的抵抗能力有所提升。

(2)对间作棉花根区土壤水分进行分析,结果表明土壤水分在间作模式下出现了再分配现象,即靠近枣树向土壤水分明显高于外侧棉花根区土壤水分,这为内行棉花生长发育提供了良好的基础。但土壤水分分配不均也会导致间作棉花出现明显的边行效应。对间作棉花施加水分亏缺后,枣树根区较高的土壤水分可以缓解间作棉花根区的水分亏缺。但从土壤水分运移角度考虑,虽然适量的土壤水分缓解了棉花的水分胁迫。但势必对间作枣树生长发育造成一定影响。

(3)在4行棉花试验中,D1行棉花明显受到枣树种间竞争和遮阴效果的影响,其生理指标和作物产量微低于D2行,但仍高于单作模式。D2行棉花在4行棉花中长势最好、净光合速率最大、作物产量最高。D3、D4行棉花距树较远,又受种内竞争限制,生理指标仅微高于单作。而棉花SPAD值在不同处理间无显著差异,说明果树遮阴对棉花叶绿素影响较弱。

(4)间作棉花在同时受土壤水分、预留生态位、种间竞争与互补等因素交互影响下,展现出明显的边行效应。但从各排棉花生理性状及产量变化情

况可看出,对棉花生长有利的条件更多集中在D1、D2行棉花,而非涉及全部棉花。

参考文献:

- [1] PENG Xiaobang, ThEVATHASAN N V, GORDON A M, et al. Photosynthetic response of soybean to microclimate in 26-year-old tree-based intercropping systems in Southern Ontario, Canada [J]. Plos One, 2015, 10(6): e0129467.
- [2] LIU Tongjin, CHENG Zhihui, MENG Huanwen, et al. Growth, yield and quality of spring tomato and physicochemical properties of medium in a tomato/garlic intercropping system under plastic tunnel organic medium cultivation [J]. Scientia Horticulturae, 2014, 170: 159-168.
- [3] HUANG Chengdong, LIU Quanqing, HEERINK N, et al. Economic performance and sustainability of a novel intercropping system on the North China Plain [J]. Plos One, 2015, 10(8): e0135518.
- [4] ZHANG Weiping, WANG Beijun, GAO Yanwei, et al. Competitive interaction in jujube tree/cotton agroforestry system in Xinjiang Province, northwestern China [J]. Agroforestry Systems, 2019, 93: 591-605.
- [5] 郭仁松, 田立文, 徐海江, 等. 枣树与棉花间作对不同棉花品种农艺性状及产量的影响 [J]. 中国棉花, 2013, 40(9): 25-27.
- [6] 段志平, 刘天煜, 张永强, 等. 枣棉间作系统棉花产量的形成与影响因素 [J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(3): 93-100.
- [7] 李发永, 王龙, 王兴鹏, 等. 适宜滴灌定额提高枣棉间作中棉花产量和土地生产效率 [J]. 农业工程学报, 2014, 30(14): 105-114.
- [8] 张向前, 黄国勤, 卞新民, 等. 红壤旱地玉米对间作大豆和花生边行效应影响的研究 [J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(8): 1010-1017.
- [9] 秀洪学, 董玉梅, 毛忠顺, 等. 种间互作的生态效应 I. 间作对蚕豆结瘤的影响 [J]. 南方农业学报, 2012, 43(6): 749-752.
- [10] 孙守家, 桑玉强, 孟平, 等. 华北低山丘陵区农林间作系统中小麦根系时空分布及边行效应研究 [J]. 河南农业大学学报, 2011, 45(6): 640-646.
- [11] 洪明, 朱航威, 穆哈西, 等. 不同滴头流量及灌水定额下红枣树耗水规律 [J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(1): 72-77.
- [12] 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.
- [13] 马金龙, 刘丽娟, 李小明, 等. 干旱区绿洲膜下滴灌棉田蒸散过程 [J]. 生态学杂志, 2015, 34(4): 974-981.

- [14] GAO Yingzhi, LYNCH J P. Reduced crown root number improves water acquisition under water deficit stress in maize (*Zea mays* L.) [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2016, 67(15): 4545–4557.
- [15] ZHAO Wensai, SUN Yonglin, KJELGREN R, et al. Response of stomatal density and bound gas exchange in leaves of maize to soil water deficit [J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2015, 37: 1704.
- [16] SUN Tao, LI Zizhong, WU Qi, et al. Effects of alfalfa intercropping on crop yield, water use efficiency, and overall economic benefit in the Corn Belt of Northeast China [J]. *Field Crops Research*, 2018, 216: 109–119.
- [17] 张计峰, 耿庆龙, 曹文超, 等. 氮肥品种与施氮量对滴灌红枣光合特性和产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(7): 92–98.
- [18] 史建国, 崔海岩, 赵斌, 等. 花粒期光照对夏玉米产量和籽粒灌浆特性的影响[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(21): 4427–4434.
- [19] 杨涛, 段志平, 石岩松, 等. 新疆枣棉间作下棉花光合特性及产量变化[J]. *干旱地区农业研究*, 2019, 37(1): 89–94.
- [20] 段志平, 刘天煜, 张永强, 等. 离树间距对枣麦间作小麦光合特性及产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2017, 37(11): 1445–1452.
- [21] 屈洋, 苏旺, 李翠, 等. 陕北半干旱区沟垄覆膜集水模式下糜子边际效应及生理特性[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(3): 776–782.
- [22] 吕瑞洲, 薛蔚荣, 吴松松, 等. 种植带与树干距离对间作花生生长发育及产量的影响[J]. *山西农业科学*, 2019, 47(12): 2115–2117+2134.
- [23] 王婷, 马亮, 马英杰. 干旱区枣棉复合系统细根空间分布特征及种间地下竞争关系[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(1): 54–60.
- [24] 崔吉晓, 檀海斌, 吴佳迪, 等. 微喷灌水肥一体化对河北夏玉米生长及产量的影响[J]. *玉米科学*, 2017, 25(3): 105–110.
- [25] 赵珊珊, 韩娇, 张大伟, 等. 吉林西部水田防护林对林带内温湿度和水稻产量的影响[J]. *西部林业科学*, 2015, 44(6): 31–37.
- [26] 王世伟, 潘存德, 张翠芳, 等. 枣与棉花间作巷道内的光环境研究[J]. *西南农业学报*, 2017, 30(4): 728–733.
- [27] 何平如, 张富仓, 侯翔皓, 等. 土壤水分调控对南疆滴灌棉花产量及土壤水盐分布的影响[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(2): 84–92.
- [28] 杜刚锋, 汪江涛, 孙雪冰, 等. 不同灌溉方式和灌水量对棉花冠层叶铃配置的影响[J]. *新疆农业科学*, 2019, 56(7): 1177–1186.

(上接第 137 页)

- [15] COHEN Y, FUCHS M, COHEN S, et al. Resistance to water uptake in a mature citrus tree [J]. *Journal of Experimental Botany*, 1983, 34(4): 451–460.
- [16] 李端, 司建华, 张小由, 等. 胡杨(*Populus euphratica*)对干旱胁迫的生态适应[J]. *中国沙漠*, 2020, 40(2): 17–23.
- [17] 龚容, 徐霞, 田晓宇, 等. 三种锦鸡儿属植物水力结构特征及其干旱适应策略[J]. *生态学报*, 2018, 38(14): 65–74.
- [18] 齐昌民. 盐胁迫条件下不同水氮对小桐子生长和水分传输机制的影响[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016.
- [19] 张树斌, 张教林, 曹坤芳. 季节性干旱对白皮乌口树(*Tarrena depauperata Hutchins*)水分状况、叶片光谱特征和荧光参数的影响[J]. *植物科学学报*, 2016, 34(1): 117–126.
- [20] 王艳哲, 位刘秀, 孙宏勇, 等. 水氮调控对冬小麦根冠比和水分利用效率的影响研究[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(3): 282–289.
- [21] 丁红, 张智猛, 戴良香, 等. 水分胁迫和氮肥对花生根系形态发育及叶片生理活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(2): 450–456.
- [22] 刘小刚, 郝琨, 韩志慧, 等. 水氮耦合对干旱区小粒咖啡产量和品质的影响[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(2): 143–150, 160.
- [23] 杨启良, 周兵, 刘小刚, 等. 亏缺灌溉和施氮对小桐子根区硝态氮分布及水分利用的影响[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(4): 142–150.
- [24] 张林森. 陕西黄土高原地区苹果园分区灌溉和施钾的效应[D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2012.
- [25] 荣焯, 杨启良, 张京, 等. 调亏灌溉对小桐子幼树形态特征与水分利用的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2015, 33(1): 130–135.
- [26] 陈亚宁, 郝兴明, 李卫红, 等. 极端干旱环境下的胡杨木质部水力特征[J]. *生态学报*, 2012, 32(9): 2748–2758.