

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2022.14142

不同间套作模式对棉花产量和生物量累积、分配的影响

李鑫¹ 王剑² 李亚兵^{2,*} 韩迎春² 王占彪² 冯璐² 王国平^{1,2}
熊世武² 李存东^{1,*} 李小飞^{2,*}

¹ 棉花生物学国家重点实验室河北基地 / 河北农业大学农学院, 河北保定 071001; ² 棉花生物学国家重点实验室 / 中国农业科学院棉花研究所, 河南安阳 455000

摘要: 发展棉花间套作体系是缓解我国黄河流域棉花与其他作物争地矛盾的主要策略, 但目前对棉花间套作体系下棉花的增产机理尚不明确。因此, 本研究通过田间试验设置了棉花与小麦、大蒜和花生间套作, 并对其根系分别采取塑料膜分隔、尼龙网分隔和不分隔处理, 从而研究在隔根处理下不同作物与棉花间作对棉花产量及生物量累积的影响。研究表明: (1) 隔根处理下的不同作物与棉花间作的土地当量比(LER)大于1, 说明试验中棉花间套作体系均体现出间作优势, 且在小麦/棉花套作和大蒜/棉花套作的体系中, 小麦和大蒜对于棉花的资源竞争力大于0, 小麦和大蒜在共生期内是优势种; 花生相对于棉花的资源竞争力小于0, 在花生/棉花间作体系中, 棉花是优势种。(2) 在棉花盛蕾期, 单作棉处理的棉花的叶、茎器官的干物质累积量多于其他3个处理, 而在花铃期后, 间套作体系中的干物质累积量多于单作棉处理, 间套作体系中的棉花生殖器官干物质累积量高于单作棉处理。(3) 盛蕾期和初花期, 单作棉的茎、叶器官的分配率高于小麦套作棉花、大蒜套作棉花和花生间作棉花处理, 在盛花期和盛絮期, 处理间的差异不显著; 不同种植模式下生殖器官干物质分配率的差异与茎、叶器官相反。相关研究结果可为间套作模式下的棉花间作优势的产生机理探究提供理论支持, 为间套作体系生产力的提高提供科学依据。

关键词: 间套作; 地下部分隔; 产量优势; 生物量分配

Effects of different intercropping systems on cotton yield, biomass accumulation, and allocation

LI Xin¹, WANG Jian², LI Ya-Bing^{2,*}, HAN Ying-Chun², WANG Zhan-Biao², FENG Lu², WANG Guo-Ping^{1,2}, XIONG Shi-Wu², LI Cun-Dong^{1,*}, and LI Xiao-Fei^{2,*}

¹ College of Agricultural, Hebei Agricultural University / Hebei Base of State Key Laboratory of Cotton Biology, Baoding 071001, Hebei, China;

² Institute of Cotton Research, Chinese Academy of Agricultural Science / State Key Laboratory of Cotton Biology, Anyang 455000, Henan, China

Abstract: The development of cotton intercropping system is the main strategy to alleviate the conflict between cotton and other crops for land in the Yellow River Basin of China, but the mechanism of cotton yield increases in cotton intercropping system is still unclear. In this study, a two-year field experiment with cotton-based intercropping systems (wheat/cotton, garlic/cotton, and peanut/cotton) and three root partitions (no, mesh, and plastic partitions) to study the effects of different crops intercropped with cotton on yield, biomass accumulation and allocation. The study showed that: (1) The land equivalent ratios (LERs) of different crops intercropped with cotton were greater than 1, indicating that the cotton intercropping system in the experiment had intercropping advantage. The resource competitiveness of wheat and garlic relative to cotton was greater than 0, indicating that wheat and garlic were dominant species in the co-growth period of wheat/cotton intercropping and garlic/cotton intercropping systems, whereas the resource competitiveness of peanuts relative to cotton was less than 0, indicating that cotton was dominant species in peanut/cotton intercropping system. (2) Dry matter accumulation of the leaf and stem in sole cotton cropping system was more than that of intercropping systems at bud stage, while the dry matter accumulation in intercropping systems was more than that in

本研究由国家自然科学基金项目(31901127)资助。

This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (31901127).

* 通信作者(Corresponding authors): 李小飞, E-mail: lixiaofei01@caas.cn; 李存东, E-mail: nxylcd@hebau.edu.cn; 李亚兵, E-mail: crili-yabing1@163.com

第一作者联系方式: E-mail: lixinhbau2015@163.com

Received (收稿日期): 2021-08-09; Accepted (接受日期): 2021-11-29; Published online (网络出版日期): 2021-12-21.

URL: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20211220.1714.006.html>

sole cotton cropping after the flowering and boll stages. The reproductive organs dry matter accumulation in intercropping systems was also higher than that in sole cotton cropping system. (3) The distribution rate of the stem and leaf in sole cotton was significantly higher than that in cotton intercropped with wheat, garlic, and peanut at bud stage and initial flowering stage, but the difference was not significant at full-bloom and open boll stages. However, the opposite pattern was observed in dry matter distribution rate of reproductive organs. These results can provide theoretical support for the mechanisms of cotton intercropping advantage and scientific basis for the productivity improvement of intercropping systems.

Keywords: intercropping; root partition; yield advantage; biomass allocation

近年来,棉田间套复合体系越来越受到人们的重视和应用^[1]。不同作物与棉花间套作种植,不仅能有效地缓解粮棉、经棉和果棉争地矛盾,同步实现棉花与其他作物增产增收^[2],而且还可以作为协调作物产量与生物多样性保护之间矛盾的有效手段^[3]。大量研究证明,合理的间套作可以获得高产^[4-6]。党小燕等^[7]通过研究不同作物与棉花间作发现,棉花/花生、棉花/洋葱等间作体系具有明显的间作优势,对棉花产量没有不利影响;在河南 3 年的麦棉套作试验中,体系的土地当量比都大于 1,存在产量优势^[8]。间作作物生长期间根系分布在时间及空间上的错位分布,是复合群体高产高效、存在间作优势的主要原因之一^[9-10]。为明确配对作物间竞争与互补作用,隔根研究法被大量用于间套作间作优势研究中^[10-13]。沈荔花等^[14]对玉米/大豆进行塑料膜隔离、尼龙网隔离和无隔离处理的研究发现,根间完全或部分互作均提高了间作作物的产量。地下部作用是间套作间作优势的主要原因之一,而目前,关于棉花间套作体系中地下部作用对棉花产量影响的机制研究未见系统报道。将根系分隔方式应用于棉花间套作体系中,了解间作体系各作物的生长规律对间套作体系生产力的影响,可用于探究棉花与配对作物的根系作用对棉花产量的影响,阐述形成产量差异机理。为此,本研究通过设置棉花不同间套作模式和原位根系分隔方式,分析在隔根处理下的不同间套作配对作物对棉花产量以及不同生育期内对棉花生长发育的影响,旨在明确隔根处理下不同作物与棉花间套作产生产量差异的机理,为棉花间套作体系生产力的提高提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

田间试验设置在中国农业科学院棉花研究所东场(36°06'N, 114°21'E)试验基地。该地区气候为典型的半湿润气候,年平均气温为 14.2℃,年均降雨量 553.8 mm,日照时数为 2174.3 h,无霜期 200 d。试验起始于 2017 年,本研究在 2019 年和 2020 年进行,

试验期间的每日最高和最低气温及降水量如图 1 所示。供试土壤为沙壤土。试验起始前表层 20 cm 土壤剖面含有机质 13.0 g kg⁻¹、全氮(N) 0.74 g kg⁻¹、有效磷(P) 28.1 mg kg⁻¹、有效钾(K) 191.2 mg kg⁻¹。

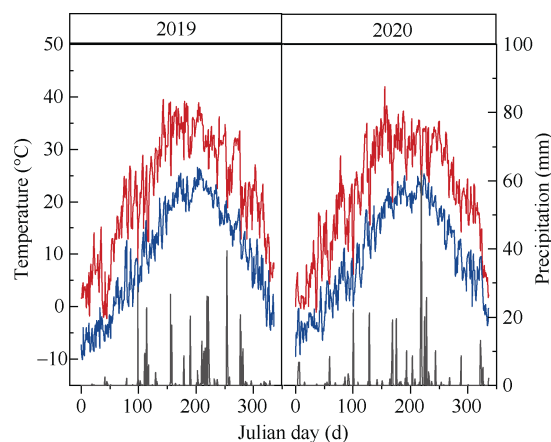


图 1 2019 年和 2020 年的每日温度和降雨量

Fig. 1 Daily air temperatures and precipitation in 2019 and 2020 日最高温度值和最低温度值的变化分别用连续的红线和蓝线表示。竖条表示每天的降雨总量。

The change of daily maximum and minimum temperature values is presented as continuous red and blue lines, respectively. Vertical bars depict the total amount of precipitation received each day for each year.

1.2 试验材料

供试棉花品种为‘中棉所 60’,小麦品种为‘中育 11 号’,大蒜品种为‘开封紫皮蒜’,花生品种为‘白沙 1016’。其中小麦和棉花种子来自中国农业科学院棉花研究所,大蒜种子由开封市农林科学研究院选育,花生种子由广东省澄海县白沙农场选育。

1.3 试验设计

试验采用两因素随机区组设计,第一因素为不同的种植模式,共设小麦/棉花(W/C)、大蒜/棉花(G/C)、花生/棉花(P/C) 3 种间套作种植模式,同时设置小麦(SW)、大蒜(SG)、花生(SP)及棉花(SC) 4 种单作模式。第 2 因素为不同的根系分隔方式,设置不分隔(N)、尼龙分隔(M)及塑料分隔(S) 3 种隔根方式。不分隔处理允许间作根部穿透并自由地交换水和养分,而尼龙网分隔阻塞根部渗透,但允许作物

行之间的水和养分移动,在塑料分隔处理中,防止任何地下种间相互作用。间套作小区面积 57.6 m^2 ($7.2 \text{ m} \times 8.0 \text{ m}$),单作小麦、大蒜和花生小区面积 32.0 m^2 ($4.0 \text{ m} \times 8.0 \text{ m}$),单作棉花小区面积 38.4 m^2 ($4.8 \text{ m} \times 8.0 \text{ m}$)。小麦/棉花套作种植模式为 4 行小麦套作 2 行棉花;大蒜/棉花套作种植模式为 4 行大蒜套作 2 行棉花;花生/棉花间作种植模式为 2 行花生间作 2 行棉花。每个间套作小区共计有 3 个 240 cm 宽的种植带,其中相邻的小麦行与棉花行间距为 50 cm,相邻的大蒜行与棉花行间距为 50 cm;相邻的花生

行与棉花行间距为 60 cm (图 2)。小麦条播,行距 20 cm,播种量 225 kg hm^{-2} ;大蒜行距 20 cm,株距 10 cm;花生行距 40 cm,株距 20 cm;棉花株距 80 cm,密度 $90,000 \text{ 株 hm}^{-2}$ 。单、间作作物行株距和种植密度一致。

各作物南北行种植。11 月初播种小麦和大蒜,6 月初收获小麦和大蒜,4 月下旬播种花生和棉花,9 月初收获花生,10 月中下旬收获棉花。在作物生育期内,所有小区灌溉、施肥、病虫害防治和化控措施参照当地高产农田管理模式。

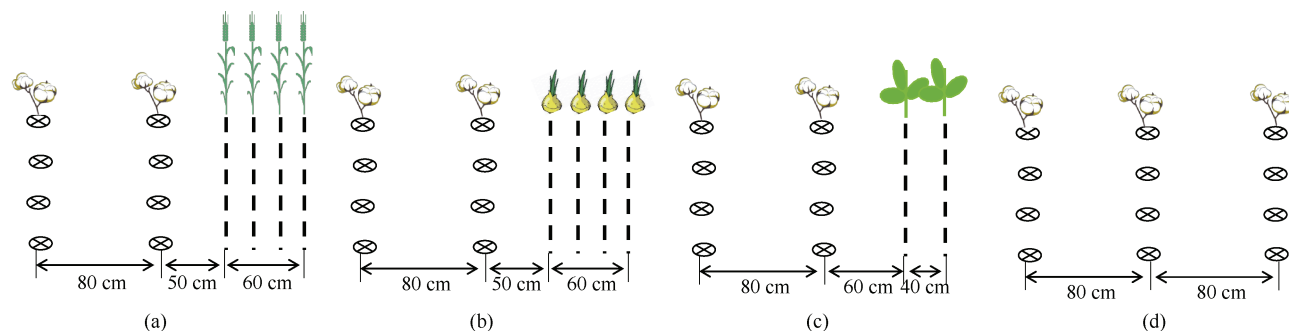


图 2 不同种植模式示意图

Fig. 2 Schematic diagram of different cropping systems

(a) 小麦/棉花套作; (b) 大蒜/棉花套作; (c) 花生/棉花间作; (d) 棉花单作。

(a) wheat/cotton intercropping; (b) garlic/cotton intercropping; (c) peanut/cotton intercropping; (d) sole cotton.

1.4 测定项目与方法

调查棉花的生育进程,分别记录单作棉(SC)、麦套棉(IC(W))、蒜套棉(IC(G))和花生间作棉(IC(P))的生育时期。分别在棉花的盛蕾期、初花期、盛花期和盛絮期,每小区选取 2 株棉花,带回实验室进行植株分解(叶片、茎秆和生殖器官),称取各器官鲜重后,置于烘箱 105°C 杀青 30 min, 80°C 烘干至恒重,称量各器官干物质重。作物收获时,于小麦、大蒜、花生和棉花各小区测产带上(中间作物组合带)收获 4 行小麦、4 行大蒜、2 行花生和 2 行棉花。

1.5 数据处理分析

采用 Microsoft Excel 19.0 (Microsoft, Bothell, WA, USA)和 SPSS 16.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA)对数据进行整理和统计分析,并用 Tukey's HSD 检验进行多重比较。

1.5.1 土地当量比(land equivalent ratio, LER)

常被定义为获得与间作相同产量所需的单作土地面积,用于衡量间作优势^[15]。其计算公式如下:

$$\text{LER} = \frac{Y_{ia}}{Y_{sa}} + \frac{Y_{ib}}{Y_{sb}} \quad (1)$$

式中, Y_{ia} 和 Y_{ib} 分别表示间作中作物 a 和 b 按照所占

面积计算的产量, Y_{sa} 和 Y_{sb} 分别代表单作中作物 a 和 b 的产量。当 $\text{LER} > 1$, 表明间作具有间作优势, 当 $\text{LER} < 1$, 表明间作不具有间作优势。

1.5.2 作物竞争力(aggressivity) 常被定义为间作体系中一种作物相对于另一种作物对水分、养分等资源的竞争力,是衡量一种作物相对于另一种作物对资源竞争能力大小的指标。计算公式如下:

$$A = \frac{Y_{ia}}{Y_{sa} \times P_a} - \frac{Y_{ib}}{Y_{sb} \times P_b} \quad (2)$$

式中, P_a 和 P_b 分别为间作中作物 a 和作物 b 的占地比例。如果 $A = 0$, 则 2 种作物具有同等的竞争性; 如果 $A > 0$, 则作物 a 占优势; 如果 $A < 0$, 则作物 b 占优势。本试验各模式中棉花与配对作物的占地比例均为 2 : 1。

1.5.3 作物生长模型 棉株生物量的累积呈“S”型曲线,其增长规律符合 Logistic 方程^[16],拟合方程的基本形式为:

$$W = \frac{W_m}{1 - ae^{-bt}} \quad (3)$$

式中, W 代表棉株生物量, W_m 代表棉株生物量的理论最大值, t 代表出苗后天数, a 、 b 代表生长参数。

对式(1)分别求 1 阶、2 阶和 3 阶导数, 根据公式计算相应生长曲线的最快生长起始时间(T_1)、快速生长终止时间(T_2)、最大相对生长速率(V_m)及其出现时间(T_m), 快速累积持续期(ΔT):

$$T_1 = -\frac{1}{b} \ln \frac{2 + \sqrt{3}}{a} \tag{4}$$

$$T_2 = -\frac{1}{b} \ln \frac{2 - \sqrt{3}}{a} \tag{5}$$

$$T_m = -\frac{\ln a}{b} \tag{6}$$

$$\Delta T = T_2 - T_1 \tag{7}$$

$$V_m = \frac{b \times W_m}{4} \tag{8}$$

2 结果与分析

2.1 不同模式对棉花生育期的影响

由表 1 可知, 同一分隔方式下, 与单作棉相比, 2019 年麦套棉和蒜套棉全生育期分别延长 2~5 d 和 0~4 d; 麦套棉苗期和蕾期天数较其他间套作模式明显延长。2020 年麦套棉、蒜套棉和花生间作棉, 相比于单作棉全生育期分别延长了 0~6、0~3 和 1~4 d;

麦套棉苗期天数较其他间套作模式明显延长; 在花铃期, 不分隔处理的棉花生育期较塑料分隔处理明显延长。

2.2 不同间套作模式的产量优势

由表 2 可以看出, 在 2 年中, 小麦、大蒜、棉花的间作产量均高于单作, 而花生间作产量低于单作。在单作棉花中, 同一种植模式下, 塑料分隔处理下的产量明显高于不分隔和尼龙分隔处理。LER 是衡量间套作产量优势的一项指标。各间作处理的 LER 均大于 1, 具有明显的间作优势。2019 年, 在间作模式上, LER 从大到小依次为: 蒜套棉>麦套棉>花生间作棉。在分隔方式上, 蒜套棉和花生间作棉处理中, LER 大小顺序为: 不分隔>尼龙分隔>塑料分隔; 而麦套棉处理中则为: 尼龙分隔与不分隔接近, 大于塑料分隔。其中麦套棉尼龙分隔的 LER 最高, 达 1.25; 花生间作棉塑料分隔最低, 为 1.10。2020 年, 在间作方式上, LER 从大到小依次为: 麦套棉>蒜套棉>花生间作棉。在分隔方式上, LER 从大到小依次为: 尼龙分隔>不分隔>塑料分隔。其中麦套棉塑料分隔处理的 LER 最高, 达 1.35; 花生间作

表 1 棉花生育进程
Table 1 Growth process of cotton

种植方式 Cropping system	分隔方式 Root partition	生育阶段天数 Growth period (d)									
		出苗期 Emergence stage		苗期 Seedling stage		蕾期 Squaring stage		花铃期 Flowering and boll formation stage		全生育期 Full growth period	
		2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020
SC	N	19 Aa	12 Aa	32 Ba	39 Ba	26 Ba	28 Aa	53 Aa	52 Aa	129 BCa	131 Ba
	M	19 Aa	12 Aa	33 Ba	39 Ba	26 Ba	28 Aa	51 Aa	54 Aab	128 BCa	133 Ba
	S	19 Aa	12 Aa	32 Ba	38 Ba	26 Ba	29 Aa	53 Aa	49 Ab	131 BCa	129 Ba
IC(W)	N	19 Aa	12 Aa	34 Aa	43 Aa	26 Aa	28 Aa	54 Aa	54 Aa	133 Aa	136 Aa
	M	19 Aa	12 Aa	36 Aa	42 Aa	27 Aa	29 Aa	52 Aa	51 Aab	133 Aa	133 Aa
	S	19 Aa	12 Aa	35 Aa	42 Aa	27 Aa	29 Aa	52 Aa	52 Ab	133 Aa	135 Aa
IC(G)	N	19 Aa	12 Aa	33 Ba	39 Ba	25 Ba	29 Aa	54 Aa	54 Aa	130 ABa	134 ABa
	M	19 Aa	12 Aa	32 Ba	38 Ba	25 Ba	30 Aa	56 Aa	53 Aab	132 ABa	133 ABa
	S	19 Aa	12 Aa	32 Ba	39 Ba	26 Ba	30 Aa	53 Aa	52 Ab	131 ABa	132 ABa
IC(P)	N	19 Aa	12 Aa	33 Ba	38 Ba	25 Ba	29 Aa	52 Aa	55 Aa	129 Ca	135 ABa
	M	19 Aa	12 Aa	33 Ba	38 Ba	24 Ba	30 Aa	52 Aa	54 Aab	128 Ca	134 ABa
	S	19 Aa	12 Aa	33 Ba	38 Ba	25 Ba	30 Aa	51 Aa	51 Ab	128 Ca	130 ABa

同列不同大写字母表示相同分隔方式下不同种植模式的差异在 0.05 水平显著, 同列不同小写字母表示相同种植模式下不同分隔方式的差异在 0.05 水平显著。SC: 单作棉; IC(W): 麦套棉; IC(G): 蒜套棉; IC(P): 花生间作棉; N: 不分隔; M: 尼龙分隔; S: 塑料分隔。
Different uppercase letters in the same column indicate that the differences between different cropping systems under the same root partition at the 0.05 probability level, and different lowercase letters in the same column indicate that the differences between different root partitions under the same cropping system at the 0.05 probability level. SC: sole cotton; IC(W): intercropped cotton with wheat; IC(G): intercropped cotton with garlic; IC(P): intercropped cotton with peanut. N: no partition; M: mesh partition; S: plastic partition.

表 2 不同间套作体系产量及间作优势
Table 2 Yield and yield advantages in intercropping systems

年份 Year	处理		配对作物		棉花		土地当量比 LER	偏土地当量比		配对作物相 对于棉花的 资源竞争力 Aggressivity
	Treatment		Paired crops (t hm ⁻²)		Cotton (t hm ⁻²)			Partial LER		
	种植方式 Cropping system	分隔方式 Root partition	间作 Inter- crop	单作 Sole	间作 Inter- crop	单作 Sole		配对作物 Paired crops	棉花 Cotton	
2019	W/C	N	22.20 Aa	17.63 Ab	4.70 Aa	3.87 Ab	1.23 A	0.42 A	0.81 A	0.04 A
		M	20.29 Aa	17.81 Ab	5.29 Aa	4.07 Ab	1.25 A	0.38 A	0.87 A	-0.16 A
		S	23.73 Aa	19.25 Ab	4.51 Aa	4.58 AB	1.07 A	0.41 A	0.66 A	0.24 A
	平均值	Mean	22.07 a	18.23 b	4.83 a	4.17 b	1.18 A	0.40 A	0.78 A	0.04 A
	G/C	N	14.37 Aa	9.72 Aa	4.80 Aa	3.87 Ab	1.38 A	0.53 A	0.86 A	0.30 A
		M	15.75 Aa	11.91 Aa	5.17 Aa	4.07 Ab	1.32 A	0.47 A	0.86 A	0.12 A
		S	13.77 Aa	12.37 Aa	5.38 Aa	4.58 AB	1.17 A	0.38 A	0.79 A	-0.03 A
	平均值	Mean	14.63 a	11.33 b	5.11 a	4.17 b	1.29 A	0.46 A	0.83 A	0.13 A
	P/C	N	4.06 Aa	6.40 Aa	5.75 Aa	3.87 Ab	1.21 A	0.22 A	0.99 A	-0.82 A
		M	4.41 Aa	5.51 Aa	5.07 Aa	4.07 Ab	1.11 A	0.27 A	0.84 A	-0.47 A
		S	4.03 Aa	5.71 Aa	5.93 Aa	4.58 Aa	1.10 A	0.23 A	0.87 A	-0.59 A
	平均值	Mean	4.17 b	5.87 a	5.58 a	4.17 b	1.14 A	0.24 A	0.90 A	-0.63 A
2020	W/C	N	16.73 Aa	12.78 Ab	4.08 Aa	3.01 Ab	1.35 A	0.44 A	0.91 A	-0.03 A
		M	16.10 Aa	11.06 Ab	3.99 Aa	3.08 Ab	1.35 A	0.49 A	0.87 A	0.16 A
		S	15.05 Aa	12.70 Ab	3.82 Aa	3.15 Ab	1.22 A	0.41 A	0.81 A	0.05 A
	平均值	Mean	15.96 a	12.18 b	3.97 a	3.08 b	1.31 A	0.45 A	0.86 A	0.04 A
	G/C	N	28.12 Aa	22.83 Ab	3.71 Aa	3.01 Ab	1.24 A	0.41 A	0.83 A	-0.01A
		M	28.71 Aa	22.23 Ab	3.85 Aa	3.08 Ab	1.28 A	0.44 A	0.84 A	0.05 A
		S	30.04 Aa	24.69 Ab	3.87 Aa	3.15 Ab	1.24 A	0.42 A	0.82 A	0.02 A
	平均值	Mean	28.96 a	23.25 b	3.81 a	3.08 b	1.25 A	0.42 A	0.83 A	0.02 A
	P/C	N	1.67 Bb	2.20 Ba	3.72 Aa	3.01 Ab	1.09 A	0.27 A	0.83 A	-0.44 A
		M	1.93 ABb	2.88 ABa	4.23 Aa	3.08 Ab	1.14 A	0.22 A	0.92 A	-0.71 A
		S	1.96 Ab	3.10 Aa	3.84 Aa	3.15 Ab	1.03 A	0.21 A	0.82 A	-0.58 A
	平均值	Mean	1.85 b	2.73 a	3.93 a	3.08 b	1.09 A	0.23 A	0.85 A	-0.58 A

同列不同大写字母表示相同体系的单间作下分隔方式的差异在 0.05 水平显著, 同列不同小写字母表示相同体系的分隔方式下单间作的差异在 0.05 水平显著。W/C: 小麦/棉花; G/C: 大蒜/棉花; P/C: 花生/棉花; N: 不分隔; M: 尼龙分隔; S: 塑料分隔。
Different uppercase letters in the same column indicate that the differences between root partitions under the same cropping system at the 0.05 probability level, and different lowercase letters in the same column indicate that the differences between sole and intercropping under the same root partition at the 0.05 probability level. W/C: wheat/cotton; G/C: garlic/cotton; P/C: peanut/cotton; N: no partition; M: mesh partition; S: plastic partition; LER: land equivalent ratio.

棉塑料分隔最低, 为 1.03, 几乎没有产量优势。2 年平均而言, 间作小麦、间作大蒜和间作花生的偏土地当量比分别为 0.43、0.44 和 0.24, 与花生间作棉花的偏土地当量比(0.88)要高于与小麦和大蒜套作的棉花偏土地当量比(分别为 0.82 和 0.83), 根系分隔降低了棉花和配对作物的偏土地当量比。在小麦/棉花和大蒜/棉花的体系中, 小麦和大蒜相对于棉花的资源竞争力多为正值, 说明小麦/棉花、大蒜/棉花体系中棉花对资源的竞争力弱于小麦、大蒜, 棉花在共生期内不是优势种, 而在花生/棉花体系中, 花

生相对于棉花的资源竞争力为负值, 说明在花生/棉花体系中棉花对资源的竞争力强于花生, 棉花在体系中占据主导地位。

由表 3 可知, 种植方式对配对作物的间作产量和单作产量具有显著的影响, 对棉花产量无显著影响; 根系分隔因素仅对棉花单作产量具有显著影响; 种植方式和根系分隔对棉花和配对作物的间作、单作产量均无互作效应。此外, 配对作物的间作产量、棉花的间作产量和单作产量的年际间差异较大。

表 3 不同因素对棉花和配对作物产量影响的方差分析表

Table 3 Analysis of variance for the effects of different factors on yields of cotton and paired crops

变异来源 Source of variance	小麦/棉花 Wheat/cotton				大蒜/棉花 Garlic/cotton				花生/棉花 Peanut/cotton			
	小麦 Wheat		棉花 Cotton		大蒜 Garlic		棉花 Cotton		花生 Peanut		棉花 Cotton	
	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
年份 Year	76.71	< 0.01	37.97	< 0.01	273.64	< 0.01	65.74	< 0.01	119.43	< 0.01	81.77	< 0.01
种植方式 Cropping systems	30.16	< 0.01	23.78	< 0.01	32.28	< 0.01	32.16	< 0.01	26.81	< 0.01	55.68	< 0.01
分隔方式 Root partitions	1.40	0.27	0.48	0.63	1.14	0.34	2.41	0.11	0.09	0.92	1.49	0.25
年份 × 种植方式 Year × Cropping systems	< 0.01	0.97	0.50	0.49	2.31	0.14	0.51	0.48	2.74	0.11	3.42	0.08
年份 × 分隔方式 Year × Root partitions	1.24	0.31	0.59	0.56	0.97	0.39	0.94	0.41	1.33	0.29	2.65	0.09
种植方式 × 分隔方式 Cropping systems × Root partitions	0.13	0.88	2.26	0.13	0.51	0.61	0.13	0.88	0.28	0.76	0.30	0.75
年份 × 种植方式 × 分隔方式 Year × Cropping systems × Root partitions	0.99	0.39	0.92	0.41	0.37	0.70	0.06	0.95	1.01	0.38	1.62	0.22

2.3 不同作物与棉花间作对棉花产量构成的影响

从表 4 中可以看出, 种植方式显著影响棉花铃数。2019 年, 与单作棉相比, 蒜套棉和花生间作棉铃数分别显著增加 17.5%~23.3%和 17.1%~38.6%; 2020 年, 与单作棉相比, 麦套棉、蒜套棉和花生间作棉的铃数均有显著的提高, 分别增加 10.2%~32.7%、19.4%~25.0%和 13.6%~27.6%。2020 年, 种植方式显著影响棉花铃重, 与单作棉相比, 麦套棉和花生间作棉的铃重分别增加 2.4%~9.8%和 4.8%~7.9%。2 年, 种植方式和分隔方式对棉花衣分的影响均不显著, 分隔方式对棉花的产量构成影响不显著, 种植方式和分隔方式间不存在互作效应。

2.4 不同配对作物与棉花间套作对棉花生物量积累的影响

对 2 年中不同生育时期在不同种植模式及隔根处理下棉株地上部干物质积累量的数据进行拟合分析(表 5)发现, 不同处理的干物质积累均符合 Logistic 生长曲线方程: $W = W_m/(1+ae^{-bt})$ 。因此根据 Logistic 方程求得生物量快速累积起始时间(T_1)和终止时间(T_2)、干物质最大相对生长速率(V_m)及其出现

时间(T_m), 对地上部生物量的动态累积量进行统计分析。2019 年和 2020 年的平均决定系数(R^2)分别为 0.9741 和 0.9946 (均为 $P < 0.01$), 因此, 拟合参数可以用来分析不同处理对棉株生长特性的影响。2019 年, 在 78~85 d 间, 单作棉累积速率最高, 其中单作塑料分隔处理的累积速率达 $255.33 \text{ kg hm}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 而麦套棉在 68~75 d 间累积速率最高, 其中麦套棉尼龙分隔处理的累积速率达 $315.97 \text{ kg hm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 。81~94 d 间, 蒜套棉生物量累积速率最高, 其中蒜套棉塑料隔根处理的累积速率达 $288.07 \text{ kg hm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 。在 82~85 d 间, 花生间作棉的生物量累积速率最高, 其中花生间作棉尼龙隔根处理的累积速率达 $362.38 \text{ kg hm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 。2020 年, 在 85~90 d 间, 单作棉累积速率最高, 其中单作棉尼龙隔根处理的累积速率达 $258.18 \text{ kg hm}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 而麦套棉在 92~107 d 累积速率最高, 其中麦套棉尼龙隔根处理的累积达 $210.92 \text{ kg hm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 。蒜套棉生物量累积速的棉花在 89~97 d 间累积速率最高, 其中蒜套棉塑料隔根处理的累积速率达 $288.07 \text{ kg hm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 。花生间作棉在 86~94 d 间生物量累积速率最高, 其中花生间作棉不分隔处理的累积速率达 $258.46 \text{ kg hm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 。

表 4 不同处理下棉花产量构成差异
Table 4 Differences of cotton yield components under different treatments

变量 Variate	种植方式 Cropping system	2019				2020			
		N	M	S	平均值 Mean	N	M	S	平均值 Mean
铃重 Boll weight (g)	SC	5.24 Aa	5.42 Aa	5.64 Aa	5.43 A	5.46 Ba	5.31 Ba	5.25 Ba	5.34 B
	IC(W)	5.70 Aa	5.74 Aa	5.76 Aa	5.73 A	5.59 Aa	5.61 Aa	5.77 Aa	5.65 A
	IC(G)	5.59 Aa	5.61 Aa	5.69 Aa	5.63 A	5.38 Ba	5.52 Ba	5.39 Ba	5.43 B
	IC(P)	5.62 Aa	5.76 Aa	5.76 Aa	5.71 A	5.72 Aa	5.73 Aa	5.61 Aa	5.68 A
	平均值 Mean	5.54 a	5.63 a	5.71 a		5.54 a	5.54 a	5.51 a	
衣分 Lint percentage (%)	SC	38.19 Aa	38.04 Aa	37.65 Aa	37.96 A	39.80 Aa	39.69 Aa	40.11 Aa	39.87 A
	IC(W)	38.08 Aa	38.29 Aa	37.58 Aa	37.98 A	39.80 Aa	39.92 Aa	39.63 Aa	39.78 A
	IC(G)	37.54 Aa	37.96 Aa	38.16 Aa	37.88 A	38.86 Aa	39.88 Aa	39.96 Aa	39.57 A
	IC(P)	38.11 Aa	38.33 Aa	38.01 Aa	38.15 A	39.41 Aa	39.79 Aa	39.68 Aa	39.63 A
	平均值 Mean	37.98 a	38.155 a	37.85 a		39.47 a	39.82 a	39.85 a	
铃数 No. of bolls ($\times 10^4$ bolls hm^{-2})	SC	73.54 Ca	74.73 Ca	79.89 Ca	76.06 C	55.07 Ba	57.93 Ba	60.13 Ba	57.71 B
	IC(W)	82.33 BCa	92.49 BCa	78.72 BCa	84.51 BC	73.11 Aa	71.39 Aa	66.29 Aa	70.26 A
	IC(G)	86.45 ABa	92.15 ABa	96.05 ABa	91.55 AB	68.85 Aa	69.86 Aa	71.81 Aa	70.17 A
	IC(P)	101.94 Aa	87.54 Aa	103.15 Aa	97.54 A	65.17 Aa	73.90 Aa	68.32 Aa	69.13 A
	平均值 Mean	86.07 a	86.73 a	89.45 a		65.55 a	68.27 a	66.64 a	

变异来源 Source of variance	铃重 Boll weight	衣分 Lint percentage	铃数 No. of bolls	铃重 Boll weight	衣分 Lint percentage	铃数 No. of bolls
种植方式 Cropping system (C)	ns	ns	*	*	ns	*
分隔方式 Root partition (R)	ns	ns	ns	ns	ns	ns
种植方式×分隔方式 C × R	ns	ns	ns	ns	ns	ns

同列不同大写字母表示相同分隔方式下不同种植模式的差异在 0.05 水平显著，同列不同小写字母表示相同种植模式下不同分隔方式的差异在 0.05 水平显著。*: $P < 0.05$; ns: 无显著差异。缩写同表 1。

Different uppercase letters in the same column indicate significant differences between different cropping systems under the same root partition at the 0.05 probability level, and different lowercase letters in the same column indicate significant differences between different root partitions under the same cropping system at the 0.05 probability level. *: $P < 0.05$; ns: not significant. Abbreviations are the same as those given in Table 1.

表 5 不同处理对棉花地上部生物量累积特征值的影响
Table 5 Effects of different treatments on the accumulation characteristic values of cotton above-ground biomass

年份 Year	种植方式 Cropping system	分隔方式 Root partition	R^2	W_m ($\times 10^3$ kg hm^{-2})	T_1 (DAP)	T_2 (DAP)	ΔT (d)	T_m (d)	V_m (kg hm^{-2} d^{-1})
2019	SC	N	0.9300	16.22	63	112	49	87	217.98
		M	0.9625	16.33	56	100	44	78	246.36
		S	0.9975	17.06	63	107	44	85	255.33
	IC(W)	N	0.9939	14.92	55	94	38	75	256.82
		M	0.9961	14.24	54	83	30	68	315.97
		S	0.9958	16.69	55	91	36	73	307.66
	IC(G)	N	0.9975	14.21	61	101	40	81	235.14
		M	0.9840	21.38	66	123	57	94	247.58
		S	0.9826	19.01	68	112	43	90	288.07
	IC(P)	N	0.9586	16.23	65	98	33	82	322.57
		M	0.9081	17.59	67	99	32	83	362.38
		S	0.9831	16.83	61	110	50	85	223.06

(续表 5)

年份 Year	种植方式 Cropping system	分隔方式 Root partition	R^2	W_m ($\times 10^3 \text{ kg hm}^{-2}$)	T_1 (DAP)	T_2 (DAP)	ΔT (d)	T_m (d)	V_m ($\text{kg hm}^{-2} \text{ d}^{-1}$)
2020	SC	N	0.9988	11.02	66	104	38	85	189.38
		M	0.9978	13.95	72	108	36	90	258.18
		S	0.9976	12.36	68	101	33	85	249.06
	IC(W)	N	1.0000	12.85	75	110	35	92	239.92
		M	0.9828	15.92	74	126	52	100	201.13
		S	0.9913	17.65	79	134	55	107	210.92
	IC(G)	N	0.9901	13.40	68	110	42	89	208.14
		M	0.9937	15.50	72	123	51	97	198.79
		S	0.9999	15.32	74	111	37	93	274.08
	IC(P)	N	0.9939	12.55	70	102	32	86	258.46
		M	0.9943	14.13	67	104	37	86	249.90
		S	0.9960	16.19	71	116	45	94	235.09

W_m : 棉株生物量理论最大值; T_1 : 生物量快速累积起始时间; T_2 : 生物量快速累积终止时间; ΔT : 生物量快速累积持续时间; T_m : 最大相对生长速率出现时; V_m : 最大相对生长速率。缩写同表 1。

W_m : the theoretical maximum value of cotton plant biomass; T_1 : the start time of rapid biomass accumulation; T_2 : the end time of rapid biomass accumulation; ΔT : the duration of rapid biomass accumulation; T_m : when the maximum relative growth rate occurs; V_m : maximum relative growth rate. Abbreviations are the same as those given in Table 1.

由图 3 可知,不同间套作及隔根处理下的棉花生物量存在明显差异,年际间差异明显,2019 年的棉花干物质总量总体高于 2020 年。在盛蕾期,除蒜套棉处理外,其余处理的干物质积累总量和各器官干物质积累量均明显低于单作棉;不同间套作模式下的隔根处理对棉花干物质积累总量的影响也不同,在单作棉和花生间作棉模式下,尼龙分隔>不分隔>塑料分隔,在麦套棉和蒜套棉模式下,塑料分隔>尼龙分隔>不分隔。初花期,蒜套棉处理的棉花干物质总量和各器官干物质积累量依旧最高,其余处理间差异不明显;单作棉和花生间作棉、蒜套棉种植模式下的隔根处理对棉花生长影响规律同盛蕾期大致相同,麦套棉中的隔根处理对棉花干物质积累影响不明显。盛花期,不同间作模式的棉花干物质总量变化规律为:麦套棉>单作棉>蒜套棉~花生间作棉;麦棉处理中不同分隔方式的棉花干物质总量变化规律为:尼龙分隔>不分隔>塑料分隔,单作棉处理下的棉花干物质总量变化规律为:不分隔~尼龙分隔>塑料分隔,蒜套棉和花生间作棉处理的棉花干物质总量变化规律相似,即塑料分隔>尼龙分隔>不分隔。盛絮期,单作棉和麦套棉处理的棉花干物质总量较与盛花期降低,蒜套棉处理的干物质总量略有增长,花生间作棉处理的增长较为明显。棉花各器官干物质积累量变化规律同干物质总积累量变化相似。

2.5 不同作物与棉花间套作对棉花各器官生物量分配的影响

干物质积累是棉花产量的基础,通过研究各器官干物质的分配可优化棉花产量形成过程。从盛蕾期到吐絮期,棉花的叶、茎干物质分配比重逐渐下降,生殖器官的干物质分配逐渐升高(图 4)。盛蕾期,不同种植模式的干物质分配以茎、叶器官为主要流向,生殖器官干物质分配率较小,2019 年蒜套棉处理的生殖器官干物质分配率最高,也仅为 10.55%~24.75%,高于花生间作棉花处理,单作棉和麦套棉处理最低,2020 年各处理的生殖器官的分配率均无差异;2019 年叶器官干物质分配率为大蒜套作棉花最低,其他 3 个处理中分配率无差异,2020 年处理间无显著差异;2 年不同处理间的茎器官干物质分配率无显著差异,同一种植方式中不同分隔方式间也无显著差异。初花期,生殖器官干物质分配比重快速增加,2 年分别增长至 29.20%和 20.82%,2019 年干物质分配率最高为大蒜套作棉花处理,为 37.45%~40.54%,显著高于单作棉处理,其余处理间无显著差异,2020 年种植方式间无显著差异;2 年间不同种植方式的叶器官的干物质分配率无显著差异;2019 年单作棉茎器官干物质分配率显著高于蒜套棉处理与间作棉处理,2020 年处理间差异不显著,但单作棉的茎器官分配率仍为 50.34%~51.29%。盛花期,2 年间所有处理的生殖器官的干物质分配

率开始超过 50%, 成为优势干物质分配器官, 2 年间的种植方式和分隔方式并未显著影响棉花生殖器官的干物质分配率。吐絮期, 与盛花期的各器官的干

物质分配率相似, 生殖器官分配率最高, 茎器官次之, 叶器官最低, 种植模式和分隔方式对各器官干物质分配并无显著影响。

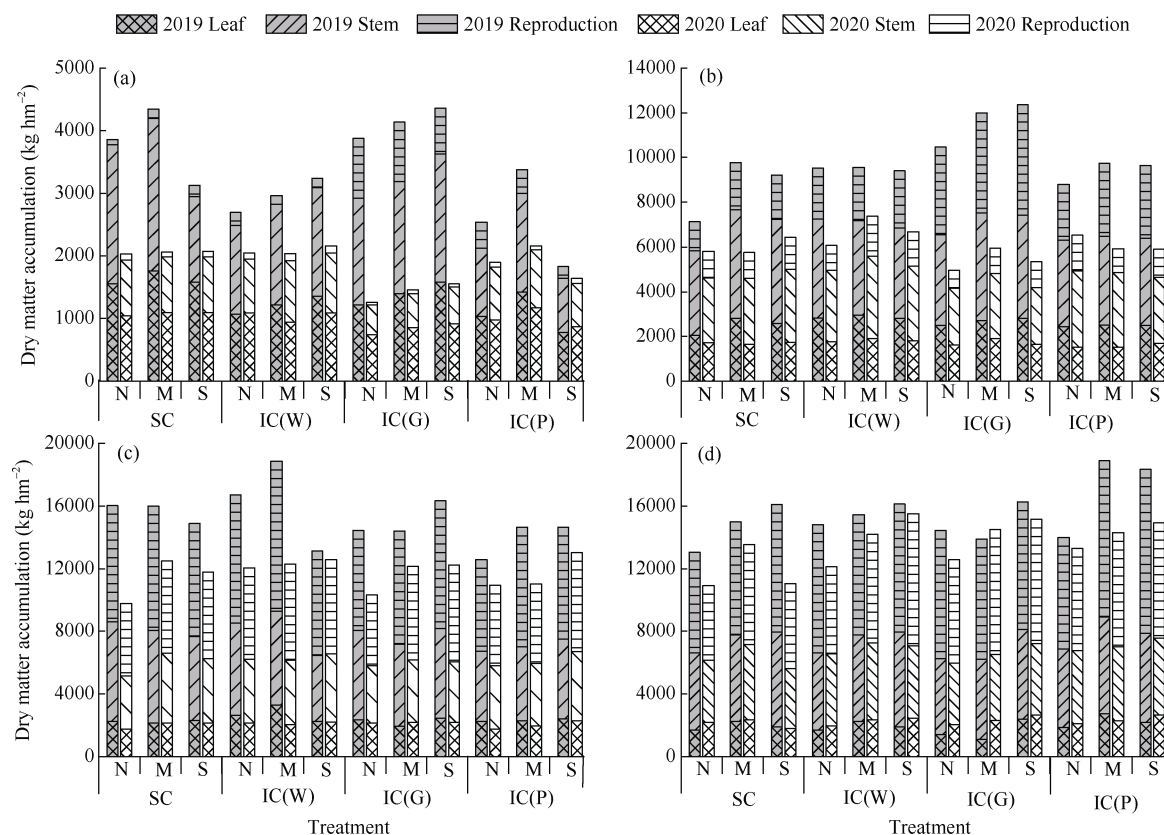
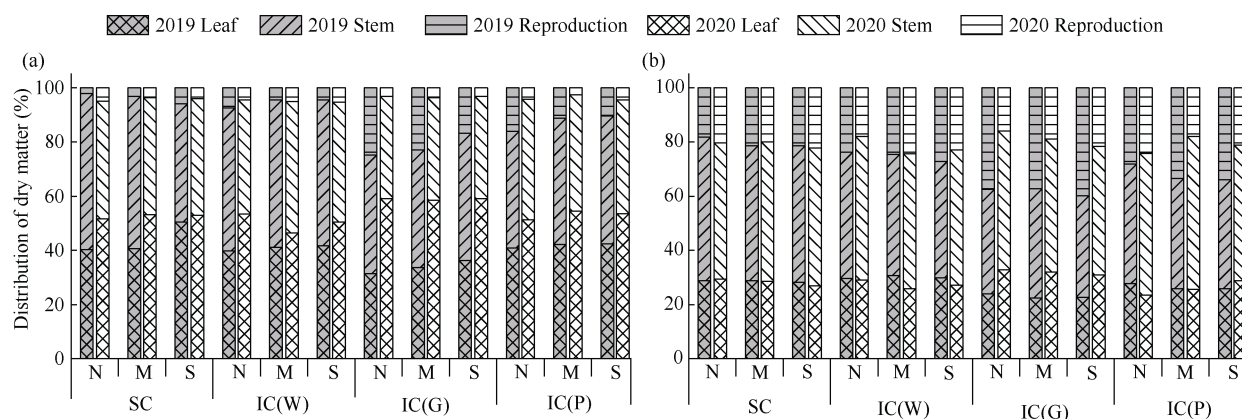


图 3 不同处理的棉花地上部生物量累积

Fig. 3 Above-ground biomass accumulation of cotton under different treatments

(a): 盛蕾期(2019 年出苗后 57 d, 2020 年出苗后 58 d); (b): 初花期(2019 年出苗后 86 d, 2020 年出苗后 88 d); (c): 盛花期(2019 年出苗后 117 d, 2020 年出苗后 115 d); (d): 盛絮期(2019 年出苗后 143 d, 2020 年出苗后 134 d)。缩写同表 1。

(a): squaring stage (57 days after emergence in 2019, 58 days after emergence in 2020); (b): initial bloom stage (86 days after emergence in 2019, 88 days after emergence in 2020); (c): full-bloom stage (117 days after emergence in 2019, 115 days after emergence in 2020); (d): open boll stage (143 days after emergence in 2019, 134 days after emergence in 2020). Abbreviations are the same as those given in Table 1.



(图 4)

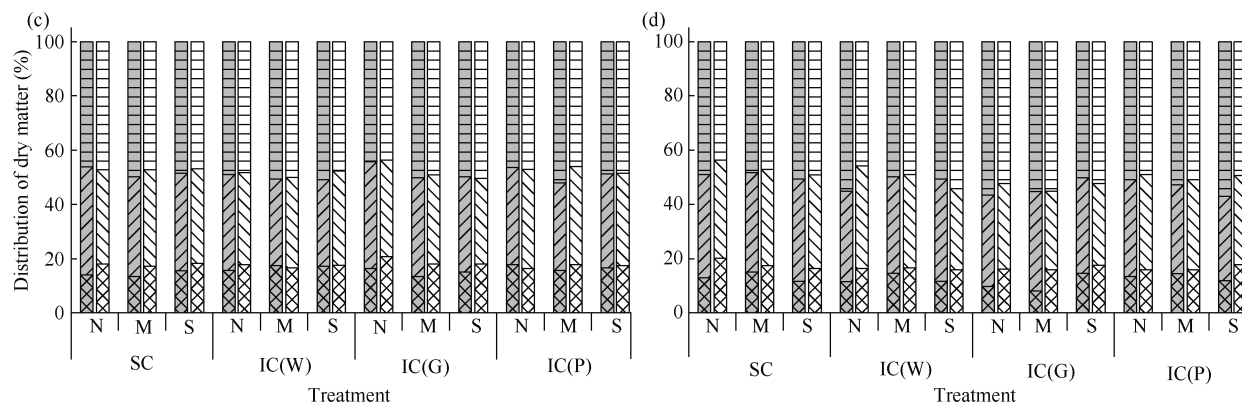


图 4 不同生育阶段干物质的分配

Fig. 4 Distribution of dry matter at different growth stages

(a): 盛蕾期(2019 年出苗后 57 d, 2020 年出苗后 58 d); (b): 初花期(2019 年出苗后 86 d, 2020 年出苗后 88 d); (c): 盛花期(2019 年出苗后 117 d, 2020 年出苗后 115 d); (d): 盛絮期(2019 年出苗后 143 d, 2020 年出苗后 134 d)。缩写同表 1。

(a): squaring stage (57 days after emergence in 2019, 58 days after emergence in 2020); (b): initial bloom stage (86 days after emergence in 2019, 88 days after emergence in 2020); (c): full-bloom stage (117 days after emergence in 2019, 115 days after emergence in 2020); (d): open boll stage (143 days after emergence in 2019, 134 days after emergence in 2020). Abbreviations are the same as those given in Table 1.

3 讨论

3.1 地下部相互作用影响棉花间套作体系下的间作优势

与单作相比, 间作可以提高土地利用效率^[15,17], 植物的养分、水分和光能利用效率^[18-19], 减少土壤中的氮输入和损失^[20], 从而提高整个体系的生产力。研究表明, 由不同作物搭配成的间套作复合群体中, 地下部分也存在着相互作用^[21-22]。在本研究中不分隔处理和尼龙分隔处理下的不同作物与棉花间作 LER 分别为 1.09~1.38 和 1.11~1.35, 高于塑料分隔处理的 LER (1.03~1.22), 说明地下部作用是棉花间套作体系存在间作优势重要原因之一。这与吕越等^[23]研究结果一致, 间套作优势是在地上部和地下部共同作用的结果。同时, 笔者根据试验结果发现, 在棉花与不同配对作物的间套作系统中, 尼龙分隔处理与不分隔处理的 LER 的差异不明显, 说明根系通过直接接触产生的相互作用对产量的影响较小, 暗示了借助根系分泌物等产生间接根系相互作用的重要性^[24]。这可能由于在本试验中选择的小麦、大蒜、花生的根系均属于须根系, 分布位置在土壤表层, 水平分布较小, 与棉花根系在空间维度的垂直方向上存在补偿效用, 但在水平方向渗透交流较少。这对选择合适的棉花间套作模式和制定适宜的行距配置提供了参考, 在选择合适的棉花间套作模式时, 除考虑 LER 最大外, 还应考虑两作物的地下部根系的渗透和水分、矿物质的交流, 最大程度发挥出棉花间套作的间作优势。

3.2 棉花间套作模式影响棉花的产量构成及干物质积累、分配

不同作物与棉花间作不同程度的影响了棉花产量及产量构成, 在 Liang 等^[25]的研究中, 绿豆/棉花间作系统的籽棉产量比棉花单作系统提高了 6.2%~7.2%。在本试验中, 间套作种植模式下的棉花, 与单作棉相比, 铃数显著提高, 麦套棉和花生间作棉的铃重也显著提高, 而在衣分上未有显著性差异(2020 年)。与李伶俐等^[26]和 Zhang 等^[8]研究结果不尽相同, 李伶俐等研究表明间套紫花苜蓿处理下的棉花的单株铃数和籽棉产量有下降趋势。Zhang 等^[8]研究了不同行间距配置的麦棉套作对棉花生长和产量的影响, 结果表明单作棉的产量要高于间套作棉花的产量。笔者以为造成这种差异的原因如下: (1) 间作作物生长期在时间和空间上错位生长, 本试验选择的棉花间套作的配对作物(大蒜、花生)在共生期内的生态位差异显著, 大蒜和花生属于矮秆作物, 在共生期内对棉花生长影响较小; (2) 后茬作物在前茬作物收获后的经历“竞争-恢复”过程^[27-28], 本试验中选择小麦和大蒜与棉花的共生期短, 在棉花苗期就已收获, 配对作物收获后的棉花生长迅速恢复。

干物质积累是棉花产量的基础, 通过研究地上部干物质的积累和分配可优化棉花产量形成过程。研究表明, 不同种植模式可通过影响作物的干物质积累最终影响作物产量^[29]。在本试验中, 不同处理在不同生育期的棉花干物质积累总量的规律不同; 蕾期, 单作棉的干物质积累总量高于其他处理, 营

养生长旺盛; 初花期到盛花期, 间套作处理的棉花的生长开始恢复, 此时棉花的间作优势开始显现, 逐渐超过单作棉; 从总体上看, 2年间大部分处理从盛花期到吐絮期棉花生殖器官的生物量是增加的。在本试验中, 2020年的各处理棉花在蕾期和初花期的生物量积累量低于2019年, 可能是2019年棉花在生育期内有效积温为 2127°C , 2020年有效积温($>12^{\circ}\text{C}$)为 1694°C , 积温差异造成棉花在两年间的生长出现差异。此外, 笔者发现不同处理中棉花在蕾期干物质分配以叶、茎为主, 随棉花生育进程的推进, 干物质分配开始向生殖器官转移, 叶、茎的干物质分配比例开始下降, 种植模式在盛蕾期和初花期对各器官的干物质分配率有影响, 但在初花期和吐絮期各处理间的差异并不显著。

此外, 本试验中种植模式显著影响棉花产量构成和干物质积累, 但尚未发现隔根处理对作物产量和生长发育的有明显的影响, 这与前人研究一致^[30]。然而齐万海等^[31]研究表明隔根处理影响间作作物的产量优势, 主要原因是降低了土壤中的水肥交流和根系在空间上的叠加补偿效应。同时, 隔根处理能够影响作物根系生物量和分布^[32], 但在本试验中未涉及间套作处理与隔根方式对棉花根系生物量的影响, 下一步将深入这方面的研究。

4 结论

本研究以小麦/棉花、大蒜/棉花、花生/棉花间套作和相应的单作为研究对象, 设置3种根系分隔方式(不分隔、尼龙网分隔和塑料膜分隔), 分析间套作体系中各作物的干物质积累过程和资源竞争力, 得出以下结论: (1) 3种间套作模式中土地当量比(LER)大于1, 小麦/棉花和大蒜/棉花模式的间作优势大于花生/棉花模式, 根系分隔降低间套作模式的间作优势; (2) 在小麦/棉花和大蒜/棉花模式中, 配对作物(小麦、大蒜)在共生期内是优势种, 花生/棉花体系中的棉花属于优势种; (3) 间套作模式下棉花与单作棉在不同生育时期内的干物质积累规律存在差异, 蕾期单作棉生长最旺盛, 初花期后, 间套作棉的间作优势显现, 干物质积累总量优于单作棉。研究结果可为间套作模式下的选择合适的间套作配置探究提供理论支持, 为间套作体系生产力的提高提供科学依据。

References

[1] 李小飞, 韩迎春, 王国平, 王占彪, 冯璐, 杨北方, 范正义, 雷

亚平, 熊世武, 邢芳芳, 李亚兵. 棉田间套复合体系提升生态系统服务功能研究进展. 棉花学报, 2020, 32: 472–482.

Li X F, Han Y C, Wang G P, Wang Z B, Feng L, Yang B F, Fan Z Y, Lei Y P, Xiong S W, Xing F F, Li Y B. Recent advances in the enhancement of agroecosystem services and functioning by cotton-based intercropping systems. *Cotton Sci*, 2020, 32: 472–482 (in Chinese with English abstract).

[2] 中国农业科学院棉花研究所. 中国棉花栽培学. 上海: 上海科学技术出版社, 2019. pp 346–350.

Institute of Cotton Research of CAAS. Cotton Cultivation in China. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 2019. pp 346–350 (in Chinese).

[3] Brooker R W, Karley A J, Newton A C, Pakeman R J, Schöb C. Facilitation and sustainable agriculture: a mechanistic approach to reconciling crop production and conservation. *Funct Ecol*, 2016, 30: 98–107.

[4] Li L, Tilman D, Lambers H, Zhang F S. Plant diversity and overyielding: insights from belowground facilitation of intercropping in agriculture. *New Phytol*, 2014, 203: 63–69.

[5] Ren W, Hu L, Zhang J, Sun C, Tang J, Yuan Y, Chen X. Can positive interactions between cultivated species help to sustain modern agriculture? *Front Ecol Environ*, 2014, 12: 507–514.

[6] 罗华, 王杰, 宋勇, 欧小球, 赵志坚, 唐玲玲, 罗琳. 玉米-大豆间套作模式研究现状及其展望. 作物研究, 2020, 34: 502–506.

Luo H, Wang J, Song Y, Ou X Q, Zhao Z J, Tang L L, Luo L. Research status and prospect of maize and soybean intercropping model. *Crop Res*, 2020, 34: 502–506 (in Chinese with English abstract).

[7] 党小燕, 刘建国, 帕尼古丽, 王江丽, 危常州, 李隆. 棉花间作模式中作物养分竞争吸收和积累动态的研究. 植物营养与肥料学报, 2013, 19: 166–173.

Dang X Y, Liu J G, Paniguli, Wang J L, Wei C Z, Li L. Accumulation and competition of nitrogen, phosphorus and potassium in cotton-based intercropping systems in Xinjiang, China. *J Plant Nutr Fert*, 2013, 19: 166–173 (in Chinese with English abstract).

[8] Zhang L, Vander W W, Zhang S, Li B, Spiertz J H J. Growth, yield and quality of wheat and cotton in relay strip intercropping systems. *Field Crops Res*, 2007, 103: 178–188.

[9] 张恩和, 黄高宝. 间套种植复合群体根系时空分布特征. 应用生态学报, 2003, 8: 1301–1304.

Zhang E H, Huang G B. Temporal and spatial distribution characteristics of the crop root in intercropping system. *Chin J Appl Ecol*, 2003, 8: 1301–1304 (in Chinese with English abstract).

[10] 刘广才, 杨祁峰, 李隆, 孙建好. 小麦/玉米间作优势及地上部与地下部因素的相对贡献. 植物生态学报, 2008, 32: 477–484.

Liu G C, Yang Q F, Li L, Sun J H. Intercropping advantage and contribution of above- and below-ground interactions in wheat-maize intercropping. *J Plant Ecol*, 2008, 32: 477–484 (in Chinese with English abstract).

[11] 李隆, 杨思存, 孙建好, 李晓林, 张福锁. 小麦/大豆间作中作物种间的竞争作用和促进作用. 应用生态学报, 1999, 10: 197–200.

Li L, Yang S C, Sun J H, Li X L, Zhang F S. Interspecific competition and facilitation in wheat/soybean intercropping system. *Chin J Appl Ecol*, 1999, 10: 197–200 (in Chinese with English abstract).

- abstract).
- [12] Li L, Sun J H, Zhang F S, Li X L, Hengel Z R, Yang S C. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping: I. Yield advantage and interspecific interactions on nutrients. *Field Crops Res*, 2001, 71: 123–137.
 - [13] 肖焱波, 李隆, 张福锁. 小麦/蚕豆间作体系中的种间相互作用及氮转移研究. *中国农业科学*, 2005, 38: 965–973.
Xiao Y B, Li L, Zhang F S. The interspecific nitrogen facilitation and the subsequent nitrogen transfer between the intercropped wheat and faba bean. *Sci Agric Sin*, 2005, 38: 965–973 (in Chinese with English abstract).
 - [14] 沈荔花, 李娜, 阮妙鸿, 林文雄. 间作隔根对玉米/大豆光合、产量及土壤理化性质的影响. *福建农业学报*, 2020, 35: 1280–1288.
Shen L H, Li N, Ruan M H, Lin W X. Effects of interactions between roots of intercropped maize and soybean on plant photosynthesis, crop yield, and soil physiochemical properties. *Fujian J Agric Sci*, 2020, 35: 1280–1288 (in Chinese with English abstract).
 - [15] Willey R. Intercropping: its importance and research needs: Part I. Competition and yield advantages. *Field Crops Abstr*, 1979, 32: 1–10.
 - [16] 薛晓萍, 王建国, 郭文琦, 陈兵林, 尤军, 周治国. 氮素水平对初花后棉株生物量、氮素累积特征及氮素利用率动态变化的影响. *生态学报*, 2006, 26: 3631–3640.
Xue X P, Wang J G, Guo W Q, Chen B L, You J, Zhou Z G. Effects of nitrogen levels on the dynamic changes of cotton plant biomass, nitrogen accumulation characteristics and nitrogen use efficiency after initial flowering. *Acta Ecol Sin*, 2006, 26: 3631–3640 (in Chinese with English abstract).
 - [17] Hauggaard N H, Ambus P, Jensen E S. Temporal and spatial distribution of roots and competition for nitrogen in pea-barley intercrops—a field study employing ^{32}P technique. *Plant Soil*, 2001, 236: 63–74.
 - [18] Zhang F S, Li L. Using competitive and facilitative interactions in intercropping systems enhances crop productivity and nutrient-use efficiency. *Plant Soil*, 2003, 248: 305–312.
 - [19] Zhu J, Werf W V D, Anten N P R, Vos J, Evers J B. The contribution of phenotypic plasticity to complementary light capture in plant mixtures. *New Phytol*, 2015, 207: 1213–1222.
 - [20] Cong W F, Hoffland E, Li L, Six J, Sun J H, Bao X G, Zhang F S, Werf W V D. Intercropping enhances soil carbon and nitrogen. *Global Change Biol*, 2015, 21: 1715–1726.
 - [21] 王自奎, 吴普特, 赵西宁, 李正中, 付小军. 作物间套作群体光能截获和利用机理研究进展. *自然资源学报*, 2015, 30: 1057–1066.
Wang Z K, Wu P T, Zhao X N, Li Z Z, Fu X J. A review of light interception and utilization by intercropped canopies. *J Nat Res*, 2015, 30: 1057–1066 (in Chinese with English abstract).
 - [22] Li Q S, Wu L K, Chen J, Khan M A, Luo X M, Lin W X. Biochemical and microbial properties of rhizospheres under maize/peanut intercropping. *J Integr Agric*, 2016, 15: 101–110.
 - [23] 吕越, 吴普特, 陈小莉, 王玉宝, 赵西宁. 地上部与地下部作用对玉米/大豆间作优势的影响. *农业机械学报*, 2014, 45(1): 129–136.
Lyu Y, Wu P T, Chen X L, Wang Y B, Zhao X N. Effect of above- and below-ground interactions on maize/soybean intercropping advantage. *Trans CSAM*, 2014, 45(1): 129–136 (in Chinese with English abstract).
 - [24] Li B, Li Y Y, Wu H M, Zhang F F, Li C J, Li X X, Lambers H, Li L. Root exudates drive interspecific facilitation by enhancing nodulation and N_2 fixation. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2016, 113: 6496–6501.
 - [25] Liang J P, He Z J. Cotton/mung bean intercropping improves crop productivity, water use efficiency, nitrogen uptake, and economic benefits in the arid area of Northwest China. *Agric Water Manage*, 2020, 240: 106277.
 - [26] 李伶俐, 阮元, 刘伟, 马宗斌, 朱伟. 间套紫花苜蓿对棉花生长发育、产量及棉田土壤微生物和酶活性的影响. *河南农业科学*, 2019, 48(6): 52–59.
Li L L, Ruan Y, Liu W, Ma Z B, Zhu W. Effects of intercropping alfalfa on growth and yield of cotton, microorganism and enzyme activities of cotton field soil. *J Henan Agric Sci*, 2019, 48(6): 52–59 (in Chinese with English abstract).
 - [27] Li L, Sun J J, Zhang F S, Li X L, Yang S C, Rengel Z. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping: I. Yield advantage and interspecific interactions on nutrients. *Field Crops Res*, 2001, 71: 123–137.
 - [28] Li L, Sun J H, Zhang F S, Li X L, Rengel Z, Yang S C. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping: II. Recovery or compensation of maize and soybean after wheat harvesting. *Field Crops Res*, 2001, 71: 173–183.
 - [29] 魏红国. 杏棉间作对棉花冠层结构、光合生产及养分运移特征的影响研究. 新疆农业大学硕士学位论文, 新疆乌鲁木齐, 2011.
Wei H G. Study on Canopy Structure, Photosynthesis Production and Nutrients Transfer Characteristics of Cotton in Apricot-cotton Intercropping System. MS Thesis of Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang, China, 2011 (in Chinese with English abstract).
 - [30] Huang C D, Liu Q Q, Gou F, Li X L, Zhang C C, van der Werf W, Zhang F S. Plant growth patterns in a tripartite strip relay intercrop are shaped by asymmetric aboveground competition. *Field Crops Res*, 2017, 201: 41–51.
 - [31] 齐万海, 柴强. 不同隔根方式下间作小麦玉米的竞争力及产量响应. *中国生态农业学报*, 2010, 18: 31–34.
Qi W H, Chai Q. Yield response to wheat/maize competitiveness in wheat/maize intercropping system under different root partition patterns. *Chin J Eco-Agric*, 2010, 18: 31–34 (in Chinese with English abstract).
 - [32] Li L, Sun J H, Zhang F S, Guo T W, Bao X G, Smith F A, Smith S E. Root distribution and interactions between intercropped species. *Oecologia*, 2006, 147: 280–290.