

文章编号:1000-8551(2020)03-0592-09

适宜套作玉米品种的物质积累与分配特性

李 丽 陈国鹏 蒲 甜 马艳玮 罗万宇 任永福 杨文钰 王小春*

(四川农业大学农学院/农业部西南作物生理生态与耕作重点实验室/作物生理生态及栽培四川省重点实验室,四川 成都 611130)

摘要:为明确适宜套作玉米品种的干物质积累分配特性,以套作减产率较高的玉米品种(珍禾玉1号、众望玉18)、套作减产率较低的玉米品种(荣玉1210)为试验材料,设置套作和单作两种种植模式,利用 ^{13}C 同位素示踪法,研究适宜套作玉米品种在套作模式下的产量及产量构成、干物质积累与分配特点。结果表明,套作减产率较高的玉米品种在套作与单作条件下的产量差异达显著水平,两年平均减产率为20.40%,而套作减产率较低的玉米品种产量在两种模式下产量差异不显著。套作减产率较高的玉米品种在套作条件下的花后干物质同化量和收获指数与单作相比分别下降了21.18%、11.24%,而套作减产率较低的玉米品种在套作模式下的花后干物质同化量和收获指数较单作分别提高了48.14%、2.42%。两类品种在套作条件下宽行穗位叶 ^{13}C 向穗分配比例较窄行高5.96%,向茎秆和穗位叶的分配分别减少5.01%、0.13%,套作减产率较低的玉米品种窄行穗位叶 ^{13}C 向穗的转移率比套作减产率较高的玉米高10.90%,但向茎秆的转移率降低了8.98%。因此,与单作相比,两类品种在套作条件下,套作减产率较低的玉米品种能够维持较高的花后干物质积累量,光合产物向籽粒的分配比例提高,收获指数增加,且套作大豆产量显著提高,实现了套作双高产的目标。本研究结果为筛选与培育适宜套作玉米品种提供了理论依据。

关键词:套作与单作;适宜套作玉米品种;干物质转运及分配; ^{13}C 同位素示踪

DOI:10.11869/j.issn.100-8551.2020.03.0592

据报道,2050年世界人口预计将达到96亿左右,相应粮食生产必须提高70%以上才能够满足人口生存需求^[1-4]。面对当前粮食存在的供需矛盾,间套作能够通过各类作物的不同组合、搭配,构建多类型、多层次、多功能的作物复合群体,提高复种指数及资源利用率,增加粮食产量^[5-6]。间套作玉米(*Zea mays* L.)是在不影响玉米产量的情况下,将其他作物种于行间,能够提高单位面积产量,对保障国家粮食安全具有重要意义^[7-9]。玉米生产实际上是干物质的积累与再分配过程,其经济产量的80%以上源于花后的光合产物。不同环境下玉米对光照的利用效率是制约产量的关键因素。因此,提高作物光能利用率是粮食增产的主要途径之一。

王小春等^[10]研究表明,在套作条件下玉米品种正红6号能够在高密度条件下保持适宜的叶面积指数,

提高当季作物产量,还有利于下季作物生长。而杨峰等^[11]研究发现,在套作条件下,与其他玉米品种相比,雅玉13的透光率降低,光能截获量增高,能够积累更多的光合产物,使产量维持在较高水平。目前,间套作玉米在传统玉米单作等行距模式基础上改进为宽窄行种植,玉米的行距增加,株距缩小,导致宽、窄行受光不均,而在这种光环境下不同玉米品种响应光环境变化的生理机制尚不明确。本研究以前期筛选出的套作减产率较低的玉米品种为试验材料,利用 ^{13}C 示踪法,以套作减产率较高的玉米品种为对照(CK),在玉米-大豆带状套作种植模式中,研究适宜套作玉米品种在套作条件下的干物质积累与分配特性,以期揭示适宜套作玉米品种的增产效应及机理,为玉米-大豆带状复合种植模式下玉米适宜品种的选育和筛选提供理论依据。

收稿日期:2018-09-05 接受日期:2019-02-24

基金项目:国家重点研发计划(2016YFD0300109),四川省育种攻关项目(2016NYZ0051-2),成都市农业技术成果应用示范项目(2015-NY01-00100-NC)

作者简介:李丽,女,主要从事作物高产优质高效栽培理论与技术研究。E-mail:1192070016@qq.com

*通讯作者:王小春,女,教授,主要从事玉米-大豆带状复合种植玉米高产与理论技术研究。E-mail:xchwang@sicau.edu.cn

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验于 2015 年和 2016 年在四川省仁寿县珠嘉乡四川现代粮食生产示范基地(30°06'N,104°21'E)进行。土壤类型为紫色壤土,土壤耕层 0~20 cm 基础理化性质:pH 值 6.47、有机质 1.45%、全氮 0.62 g·kg⁻¹、全磷

0.86 g·kg⁻¹、全钾 12.15 g·kg⁻¹、速效氮 54.72 mg·kg⁻¹、速效磷 8.47 mg·kg⁻¹、速效钾 83.79 mg·kg⁻¹。

1.2 试验材料

供试玉米品种:前期试验筛选出的套作减产率较高的玉米品种珍禾玉 1 号和众望玉 18(单作高产,套作减产率高),套作减产率较低的玉米品种荣玉 1210(单套作均高产,且单套作产量差异不显著)。大豆品种为南豆 12 号。玉米供试品种详细信息见表 1。

表 1 玉米供试品种的详细信息

Table 1 Detailed information of maize varieties

品种 Variety	适宜种植区域 Suitable planting area	推荐种植密度 Suitable recommended planting density/(株·hm ⁻²)	生育期 Growth period/d	选育单位 Breeding unit
珍禾玉 1 号 ZHY1	四川平坝、丘陵区	48 000~60 000	123	云南隆瑞种业有限公司
众望玉 18 ZWY18	四川平坝、丘陵区	48 000~60 000	112	四川省农科院作物所
荣玉 1210 RY1210	四川等地的平坝丘陵和低山区	48 000~60 000	116	四川农业大学玉米研究所

1.3 试验设计

采用二因素裂区试验设计,主因素 A 为玉米品种,A1:珍禾玉 1 号(2016 年为众望玉 18),A2:荣玉 1210;副因素 B 为不同种植模式:B1:套作,B2:单作(图 1)。共 4 个处理,每个处理 3 次重复,共 12 个小

区,小区面积为 42 m²(6 m×7 m)。玉米套作采用宽窄行种植模式,带宽 2.00 m,窄行行距为 0.40 m,每小区 2 带,单作模式行距 0.70 m,每小区种植 6 带,密度均为 60 000 株·hm⁻²。



图 1 田间种植模式图

Fig.1 Field planting patterns

玉米分别于 2015 年 3 月 25 日和 2016 年 3 月 28 日育苗,2015 年 4 月 5 日和 2016 年 4 月 8 日定向移栽。底肥配施过磷酸钙 600 kg·hm⁻²(含 P₂O₅ 12.00%)、氯化钾 150 kg·hm⁻²(含 K₂O 60.00%),玉米全生育期共施纯氮 240 kg·hm⁻²,按底肥:穗肥=5:5施用。大豆于 6 月 10 日免耕直播,宽行内均种 2 行,大豆窄行行距 0.40 m,穴留 3 株,种植密度为 120 000 株·hm⁻²,大豆基肥配施尿素 75 kg·hm⁻²、过磷酸钙 600 kg·hm⁻²、氯化钾 60 kg·hm⁻²,追肥为初花后施尿素 75 kg·hm⁻²,其他管理同大田。

1.4 测定项目与方法

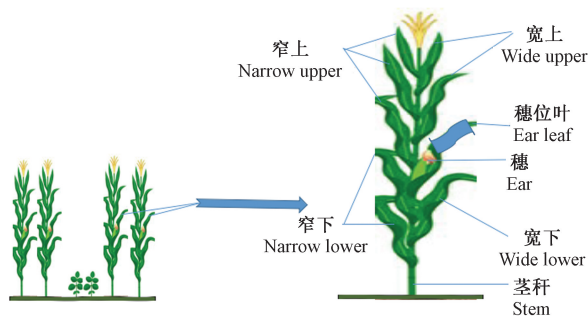
1.4.1 ¹³C 的标记与含量的测定 在玉米抽雄期,每小区选取 3 株长势一致的植株,将宽 0.15 m、长 0.80 m 的聚乙烯塑料袋分别套在宽行和窄行穗位叶上,充

入 60 mL ¹³C 标记的 CO₂,2 h 后移除塑料袋(图 2)。成熟期时将玉米按茎、穗、宽行上下部叶片、窄行上下部叶片分装,105℃杀青 1 h,80℃烘干至恒重,利用 Flash 2000 HT 元素分析仪(美国热电公司)和同位素比率质谱仪(美国热电公司)测定各部分¹³C 的含量。按照公式计算进入各组分的¹³C 含量(mg)^[12-14]:

$$^{13}C_i = C_i \times \frac{F_i - F_{\text{自然}}}{100} \times 1000 \quad (1)$$

式中,C_i:该组分的碳总量;F_i:该组分的¹³C 丰度,F_{自然}:C 的自然丰度。

1.4.2 干物质积累 从拔节期(育苗后 50 d)开始每隔 15 d 取一次样,每小区选取 5 株生长发育一致的植株,按营养器官和籽粒分装,鲜样在 105℃杀青 1 h,80℃烘干至恒重,称干物质重。

图 2 ^{13}C 的标记示意图Fig.2 Schematic diagram of ^{13}C notation

1.4.3 干物质积累过程拟合 以育苗后的天数为自变量,分别以育苗后 50、65、80、95、110 d 所取干物质重为因变量,用 Logistic 方程对干物质进行拟合^[15-17]:

$$W = A / (1 + B \times e^{-CT}) \quad (2)$$

式中, W : 单株干物质积累量; A 、 B 、 C : 干物质拟合参数; T : 育苗后天数(d)。

按照公式计算干物质积累最大速率出现的时间 (T_{\max} , d):

$$T_{\max} = \ln B / C \quad (3)$$

按照公式计算干物质积累的最大速率 (V_{\max} , $\text{g} \cdot \text{plant}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$):

$$V_{\max} = AC / 4 \quad (4)$$

对生长曲线求导, 得到平均生长速率 (V , $\text{g} \cdot \text{plant}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)。按照公式计算单株干物质积累潜力 (W_{\max} , g):

$$W_{\max} = A \quad (5)$$

1.4.4 产量 在玉米成熟期, 考察每小区有效穗数, 实打实收, 折算实际产量, 每小区另选取 20 个果穗考察穗粒数、千粒重, 并计算收获指数, 在大豆成熟期实收测产。

1.4.5 相关指标的计算 按照公式分别计算营养器官花前干物质转运量(g)、营养器官花前干物质转运率(%)、营养器官花前干物质对籽粒的贡献率(%)、花后干物质同化量(g)和收获指数^[18-19]:

营养器官花前干物质转运量 = 开花期营养器官干物质重 - 成熟期营养器官干物质重 (6)

营养器官花前干物质转运率 = (开花期营养器官干物质重 - 成熟期营养器官干物质重) / 开花期营养器官干物质重 $\times 100\%$ (7)

营养器官花前干物质对籽粒的贡献率 = (营养器官花前干物质转运量 / 成熟期籽粒干重) $\times 100\%$ (8)

花后干物质同化量 = 成熟期籽粒干物质重 - 营养器官花前干物质转运量 (9)

收获指数 = 籽粒产量 / 地上部生物量 (10)。

1.5 数据统计与分析

两年干物质积累与转运数据变化趋势一致, 因此, 本研究主要以 2016 年数据进行分析。采用 Microsoft Office Excel 2003 对数据进行整理和汇总; Origin 8.0 制作图表和拟合方程, 统计分析和差异显著性检验在 DPS7.5 数据处理系统下进行。

2 结果与分析

2.1 品种及种植模式对单株玉米干物质积累量的影响

由表 2 可知, 不同处理显著影响了对玉米各生育时期的干物质积累量。在不同种植模式下均表现为 $B1 < B2$, 且至成熟期(育苗后 110 d), $B2$ 较 $B1$ 高 3.89%。不同玉米品种在套作条件下的干物质积累量差异显著, 在封行前(育苗后 65 d) 2 个玉米品种的干物质积累规律不一致, 但花后(育苗后 80 d) 至成熟期, 套作减产率较低的玉米品种 $A2B1$ 干物质积累量均显著高于套作减产率较高的玉米品种 $A1B1$, 成熟期 $A2B1$ 干物质积累量较 $A1B1$ 高 10.69%。不同玉米品种和种植模式对干物质积累的交互影响在育苗后 65、110 d 显著。 $A1B1$ 在整个生育期的干物质积累量均

表 2 品种及种植模式对单株玉米干物质积累量的影响

Table 2 Effect of varieties and cropping patterns on maize dry matter accumulation per plant maize /g

处理 Treatments	生育期 Growth period/d				
	50	65	80	95	110
A1B1	40.59c	85.78c	119.06d	199.26c	228.50b
A1B2	42.88bc	107.33b	194.23a	248.73a	252.02a
A2B1	47.73b	75.65d	133.13c	230.10b	252.93a
A2B2	51.71a	115.79a	176.66b	227.40b	248.09a
平均值 Mean					
A1	41.74b	96.56a	156.65a	224.00b	240.26b
A2	49.72a	95.72a	154.90a	228.75a	250.51a
B1	44.16b	80.72b	126.10b	214.68b	240.72b
B2	47.30a	111.56a	185.45a	238.07a	250.06a
F 值 F value					
A	1.43*	2.02**	0.99	2.36*	5.21
B	4.07*	1.14*	3.69*	1.81	5.96*
A×B	3.01	1.50*	2.61	1.65	4.70*

注: 同列不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。* 表示在 0.05 水平上差异显著; ** 表示在 0.01 水平上差异极显著。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level. * indicates significant difference at 0.05 level. ** indicates extremely significant difference at 0.01 level. The same as following.

低于 A1B2,至成熟期,A1B1 干物质积累量较 A1B2 降低了 9.33%;而 A2B1 花前(育苗后 80 d 前)的干物质积累量显著低于 A2B2,而花后的两处理组干物质积累量无显著差异。结果表明,随着玉米生育时期的推进,窄行光胁迫加剧,不同品种对环境的适应能力产生了差异。

2.2 品种及种植模式对玉米干物质积累量 Logistic 方程拟合参数的影响

由表 3 可知,将各生育阶段单株干物质积累量(Y)和移栽后天数(X)进行 Logistic 方程拟合,其决定

系数(R^2)在 0.980~0.998 之间。在不同种植模式中,同一品种 B1 的 V_{\max} 、 W_{\max} 均高于 B2,且 T_{\max} 提前。在套作条件下,不同品种间 Logistic 方程的参数差异明显,A2B1 的 V_{\max} 和 V 分别较 A1B1 高 68.83%、101.71%;A2B1 的 T_{\max} 较 A1B1 推迟了 2.59 d。表明在套作条件下,与 A1 相比,A2 的干物质积累迅速,且 V_{\max} 后移,有利于籽粒干物质的积累。A1B1 可达到的 W_{\max} 较 A1B2 高 11.23%,而 V 则降低了 34.94%;A2B1 的 V_{\max} 较 A2B2 提高了 11.98%,且 T_{\max} 提前了 2.70 d。

表 3 不同品种及种植模式下单株玉米干物质积累量 Logistic 方程的部分参数

Table 3 Logistic equation of fitting parameters of maize dry matter accumulation under different varieties and cropping patterns

处理 Treatments	决定系数 R^2	干物质积累的最大速率 $V_{\max}/(g \cdot plant^{-1} \cdot d^{-1})$	单株干物质积累潜力 $W_{\max}/(g \cdot plant^{-1})$	干物质积累最大速率 出现的时间 T_{\max}/d	平均生长速率 $V/(g \cdot plant^{-1} \cdot d^{-1})$
A1B1	0.981	31.12	292.12	80.50	5.27
A1B2	0.991	30.85	262.63	81.19	8.10
A2B1	0.980	52.54	266.22	83.09	10.63
A2B2	0.998	46.92	252.71	85.79	9.27

2.3 品种及种植模式对玉米营养器官干物质向籽粒转运影响

由表 4 可知,不同种植模式和品种对玉米干物质转运的影响显著。不同种植模式间的干物质转运量、转运率及贡献率均差异显著,且均表现为 $B1 < B2$,但由于在套作条件下玉米生育后期的宽行光补偿效应显著,B1 的花后籽粒干物质同化量显著高于 B2。在套作模式中,不同品种间的花前干物质对籽粒的贡献率差异显著,A1B1 较 A2B1 高 5.33 个百分点,而 A2B1

的花后籽粒干物质同化量、收获指数较 A1B1 分别高 53.58%、32.50%。种植模式对不同品种营养器官干物质向籽粒转运的影响存在差异,A1B2 的花后籽粒干物质同化量、收获指数分别较 A1B1 高 26.86%、30.00%;A2B1 物质转运量、转运率及花前干物质对产量的贡献率均显著低于 A2B2;但花后籽粒干物质同化量显著高于 A2B2,提高了 48.14%;最终收获指数高于 A2B2,表明套作减产率较低的玉米品种套作优势突显在高的花后籽粒干物质积累量。

表 4 品种及种植模式对籽粒营养器官干物质向籽粒转运的影响

Table 4 Effect of varieties and cropping patterns on dry matter translocation from vegetative organ to grain of maize

处理 Treatments	花前干物质转运量 Translocation amount/g	转运率 Transportation efficiency/%	贡献率 Contribution rate/%	花后籽粒干物质同化量 Post anthesis accumulation of grain/g	收获指数 Harvest index
A1B1	14.35c	16.73c	15.56c	77.87d	0.40c
A1B2	31.24b	29.10b	24.02b	98.79b	0.52b
A2B1	13.63c	18.02c	10.23d	119.59a	0.53a
A2B2	43.93a	37.94a	35.24a	80.73c	0.50b
平均值 Mean					
A1	22.80b	22.92b	19.79b	88.33b	0.46b
A2	28.78a	27.98a	22.74a	100.16a	0.51a
B1	13.99b	17.38b	12.90b	98.73a	0.47b
B2	37.59a	33.52a	29.63a	89.76b	0.51a
F 值 F value					
A	16.27**	112.24**	69.20**	4.52	60.33*
B	4.22*	80.22*	58.44**	6.98*	15.47*
A×B	2.11*	12.56*	1.45*	0.23	1.97*

2.4 品种及种植模式对¹³C 向玉米各器官分配比例的影响

套作条件下对 2 个品种的宽行和窄行穗位叶进行¹³C 同位素标记,并计算¹³C 在穗位叶和穗子中的分配比例。两年试验结果显示,2 个品种的宽窄行穗位叶¹³C 都主要向穗转移,其中窄行穗位叶¹³C 的分配与宽行相比,¹³C 向穗的分配比例减少,向穗位叶的分配增加,表明宽行叶片的花后光合产物对穗的贡献高于窄行叶片(表 5)。为进一步探索套作条件下玉米的花后光合产物在各器官的分配,测定并计算了套作玉米各器官的¹³C 分配比例。两品种的窄行穗位叶¹³C 各器官的转运率与宽行相比,向宽行下部叶、茎秆和穗位叶转移增加,向窄行下部叶、穗转移减少。A2 中¹³C 向穗、窄行下部叶片的转移比率较 A1 分别高 11.61、0.32 个百分点,向茎秆、宽行上部叶的转移分别降低了 10.57、0.37 个百分点(表 6)。

表 6 品种及种植模式对¹³C 向玉米各器官分配比例的影响(2016)

Table 6 Effect of varieties and cropping patterns on¹³C distribution of maize organ (2016)

处理 Treatments	宽行上部叶片 Wide up leaf	宽行下部叶片 Wide lower leaf	窄行上部叶片 Narrow upper leaf	窄行下部叶片 Narrow lower leaf	茎秆 Stem	穗 Ear	穗位叶 Ear leaf
A1 标记窄行 A1 labeling narrow row	0.54a	2.58a	0.26a	0.43c	12.14a	83.75c	0.26a
A1 标记宽行 A1 labeling wide row	0.17c	0.18c	0.15b	1.16b	3.44b	94.80b	0.06c
A2 标记窄行 A2 labeling narrow row	0.12c	1.61b	0.11c	0.11d	3.16b	94.65b	0.21a
A2 标记宽行 A2 labeling wide row	0.22b	0.16c	0.26a	1.80a	1.85c	95.51a	0.15b

2.5 品种及种植模式对玉米产量与产量构成的影响

由表 7、表 8 可知,不同品种及种植模式对玉米产量构成具有显著的调控作用,最终影响籽粒产量。不同种植模式间玉米产量两年均表现为 B2 显著高于 B1。A2B1 的平均产量较 A1B1 高 22.89%,在玉米产量构成三因素中,A2B1 的穗粒数、有效穗数较 A1B1 分别提高了 15.75%、8.45%。不同品种和种植模式互作效应显著,A2 在单、套作种植模式下两年产量均差异未达到显著水平,而 A1B1 玉米的产量较 A1B2 低 20.40%。产量构成三因素中,A1B1 的有效穗数、穗粒数分别较 A1B2 低 8.42%、18.02%;A2 在单、套作模式中有效穗数无显著差异。A2B1 两年大豆产量较 A1B1 显著提高了 6.23%,其原因主要是 A2 的株型较紧凑,叶片上挺,透光率增大,大豆叶片获得更多的光能^[20],产量显著提高。表明适宜套作玉米品种不仅能获得较高的玉米产量,而且能通过调节群体光环境,实现双高产。

表 5 品种及种植模式对¹³C 向玉米穗和穗位叶的分配比例的影响(2015)

Table 5 Effect of varieties and cropping patterns on¹³C distribution of the maize ear and ear leaf proportion (2015)

处理 Treatments	穗位叶 Ear leaf	穗 Ear
A1 标记窄行 A1 labeling narrow row	9.24c	90.76a
A1 标记宽行 A1 labeling wide row	8.62d	91.38a
A2 标记窄行 A2 labeling narrow row	18.51a	81.49b
A2 标记宽行 A2 labeling wide row	10.97b	89.03a

3 讨论

本研究中,两玉米品种在单作条件下均能够达到高产,但在套作条件下,由于群体内光环境改变,套作减产率较高的玉米品种单、套作产量差异两年平均达到 1 773.57 kg·hm⁻²,而套作减产率较低的玉米品种的产量在 2 种植模式下差异不显著,再次验证了蒲甜^[21]的研究结果。研究表明,适宜的等行距(0.50 m 和 0.70 m)能够有效提高籽粒产量^[22],但也有研究发现玉米在(1.70 m+0.30 m 和 0.90 m+0.30 m)两种宽窄行种植条件下较常规等行距种植(0.65 m),能够改善冠层结构,提高穗位叶净光合速率,从而获得高产^[23]。本研究中,两玉米品种在套作条件下(1.60 m+0.40 m)的产量与单作(0.70 m 等行距)相比,均有不同程度的下降,这可能与种植方式的改变使两玉米品种的种植密度增加,群体内的光截获量增加,透光率降

表 7 品种及种植模式对玉米产量的影响
Table 7 Effect of varieties and cropping patterns on maize yield / (kg·hm⁻²)

处理 Treatments	2015			2016		
	玉米 Maize	大豆 Soybean	系统产量 System yield	玉米 Maize	大豆 Soybean	系统产量 System yield
A1B1	6 658.67c	1 547.28b	8 205.95c	7 188.60c	1 493.27b	8 681.87c
A1B2	8 378.95b	—	8 378.95c	9 015.45a	—	9 015.45b
A2B1	9 201.56a	1 657.41a	10 858.97a	7 816.20b	1 572.43a	9 388.63a
A2B2	9 843.99a	—	9 843.99b	8 459.70b	—	8 459.70c
平均值 Mean						
A1	7 518.81b	—	7 518.81b	8 102.03a	—	8 102.03a
A2	9 522.78a	—	9 522.78a	8 137.95a	—	8 137.95a
B1	7 930.12b	1 602.35	9 532.47a	7 502.40b	1 532.85	9 035.25a
B2	9 111.47a	—	9 111.47a	8 737.58a	—	8 737.58a
F 值 F value						
A	1.86	—	—	3.86	—	—
B	35.65**	—	—	45.75**	—	—
A×B	61.62**	—	—	41.62	—	—

注：“—”表示单作玉米无大豆产量及相关分析数据。

Note: ‘—’ indicates soybean yield and related analysis data were not available under monocropping.

表 8 品种及种植模式对玉米产量构成的影响
Table 8 Effect of varieties and cropping patterns on maize yield component

处理 Treatments	2015			2016		
	穗粒数 Kernels per ear	千粒重 1000-kernel weight/g	有效穗数 Effective spike /(spike·hm ⁻²)	穗粒数 Kernels per ear	千粒重 1000-kernel weight/g	有效穗数 Effective spike /(spike·hm ⁻²)
A1B1	449c	294.30a	50 357b	421c	316.20a	54 000b
A1B2	507b	289.10a	57 143a	520a	309.64a	56 000a
A2B1	564a	294.00a	55 512ab	443c	305.86a	57 660a
A2B2	588a	295.40a	56 664a	473b	310.20a	57 660a
平均值 Mean						
A1	478b	291.70a	53 750b	470a	312.92a	55 000b
A2	576a	294.70a	56 088a	458a	308.03a	57 660a
B1	494b	293.63a	54 534b	464b	292.68a	56 330b
B2	525a	297.50a	57 600a	527a	291.76a	57 663a
F 值 F value						
A	25.78**	185.89**	1.32**	16.72**	66.00**	5.51**
B	24.35**	3.50**	38.66*	27.18**	3.55	4.59*
A×B	24.92**	76.45*	23.72**	1.63	2.00	0.72

低有关^[24]。何冬冬等^[25]通过对不同玉米品种进行扩行缩株距研究发现,高产玉米品种在扩行缩距条件下产量增幅显著高于其他玉米品种,其原因是高产玉米品种根系“横向紧缩,纵向下扎”,张玉芹等^[26]和戚

廷香等^[27]也得出相似结果。这与本研究结果不同。本研究中,在影响产量形成的三因素中,与单作相比,套作减率较高的玉米品种在套作条件下的空秆增多,有效穗和穗粒数下降率高于套作减率较低的玉米品

种,而造成下降率差异的原因是来自地上还是地下的种内竞争仍有待进一步研究。

玉米的生产实际上是整个生育期光合产物的积累与分配,其经济产量的 80%以上源于植株的花后光合产物^[28-30]。大量研究表明,花后干物质的积累量与籽粒产量呈显著正相关^[31-32]。景立权等^[33]提出玉米高产的最主要途径是提高群体生物量及收获指数。而黄智鸿等^[34]研究表明,超高产玉米品种先玉 335 的收获指数显著高于其他品种,但其产量主要来源于生育后期叶片的光合作用,干物质转运对籽粒产量影响较小,这与本研究结果基本一致。本研究中,套作减产率较低的玉米品种在套作条件下的花前(育苗后 80 d 前)干物质积累量比单作低 34.67%,而花后无显著差异,且花后干物质同化量、收获指数均高于单作;套作减产率较高的玉米在套作条件下整个生育期最终的干物质积累量显著低于单作,而花后籽粒干物质同化量、收获指数均显著低于单作。两品种在不同种植模式下出现差异的原因可能是套作减产率较低的玉米在套作环境下与套作减产率较高的玉米品种相比,能够充分利用宽行补偿效应,使花后光合产物的积累优势明显。

李利利等^[35]利用¹³C 同位素示踪技术发现不同玉米品种上部和中部叶片的光合产物向籽粒中的转移最多,其次是向叶片和茎秆中转移,这与本研究结果基本一致。本研究中,两玉米品种在套作条件下花后光合产物主要向籽粒转运,其次用于植株建成。在套作条件下,两品种的窄行穗位叶¹³C 分配与宽行相比,向穗部的分配减少,向穗位叶的分配增加,表明宽行光合物质对籽粒产量的贡献高于窄行。套作减产率较低的玉米的花后光合产物向穗转移比例高于套作减产率较高的玉米品种,而向茎秆的转移比例降低。这一方面说明套作减产率较低的玉米品种在套作条件下花后光合产物的积累和分配优势明显,另一方面在套作光环境下套作减产率较低的玉米的宽行光补偿能力优于套作减产率较高的玉米品种。

4 结论

本研究结果表明,两玉米品质在单作条件下均能达到高产但在套作条件下表现出明显差异,套作减产率较高的玉米品种在套作条件下较单作两年平均减产率达 20.40%,但系统产量二者差异不显著,而套作减产率较低的玉米品种在两种种植模式下,玉米产量差异不显著,但套作模式下的系统产量显著高于单作模式。在玉米-大豆套作种植模式中,套作减产率较低

的玉米品种其物质生产优势主要表现在生育后期,其花后籽粒干物质同化量显著高于套作减产率较高的玉米品种。在套作条件下,两品种的窄行穗位叶同化物质主要向穗和宽行下部叶转运,而宽行主要向穗和窄行下部叶转运,套作减产率较低的玉米品种在套作光环境下,宽行穗位叶向穗中转移的比例增加,花后形成较高的物质同化量,提高收获指数,从而保持了较高的套作产量。¹³C 标记技术也进一步揭示了套作种植模式下适宜玉米品种对群体光环境发生变化时化后干物质的分配特性,但适宜套作玉米品种关于地下部分的根系生长特性及机理需要通过进一步试验加以明确。

参考文献:

- [1] Diouf J. FAO's Director-General on How to Feed the World in 2050 [J]. *Population and Development Review*, 2009, 35(4): 837-839
- [2] Bruinsma J. The resource outlook to 2050: By how much do land, water and crop yields need to increase by 2050 [C]//FAO Expert Meeting on How to Feed the Word in 2050. 2009: 1-33
- [3] Rosegrant M W, Ringler C, Zhu T J. Water for agriculture: Maintaining food security under growing scarcity [J]. *Annual Review of Environment Resources*, 2009, 34: 205-222
- [4] Rabbinge R, Bindraban P S. Making more food available: Promoting sustainable agricultural production [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2012, 11(1): 1-8
- [5] 逢焕成, 赵跃龙. 国外间混套作的研究进展 [J]. *世界农业*, 1994(11): 21-23
- [6] Cermak F, Rosen A. The Case of Intercorp, a multilingual parallel corpus [J]. *International Journal of Corpus Linguistics*, 2012, volume 17(13): 411-427
- [7] 杨峰, 娄莹, 廖敦平, 高仁才, 雍太文, 王小春, 刘卫国, 杨文钰. 玉米-大豆带状套作行距配置对作物生物量、根系形态及产量的影响 [J]. *作物学报*, 2015, 41(4): 642-650
- [8] Amossé C, Jeuffroy M H, David C. Relay intercropping of legume cover crops in organic winter wheat: Effects on performance and resource availability [J]. *Field Crops Research*, 2013, 145(4): 78-87
- [9] Yang F, Huang S, Gao R C, Liu W G, Yong T W, Wang X C, Wu X L, Yang W Y. Growth of soybean seedlings in relay strip intercropping systems in relation to light quantity and red: far-red ratio [J]. *Field Crops Research*, 2014, 155(1): 245-253
- [10] 王小春, 杨文钰, 张超, 程元帅. 川中丘区套作条件下不同株型玉米高产优质群体构建 [J]. *四川农业大学学报*, 2009, 27(2): 153-156
- [11] 杨峰, 黄山, 崔亮, 王小春, 雍太文, 刘卫国, 杨文钰. 玉米/大豆套作下作物叶片氮、磷动态特征及其相关性分析 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(4): 781-789
- [12] 闫川, 洪晓富, 阮关海, 余守武, 王绍华, 丁艳锋. 大穗型水稻¹³C 光合产物的积累与分配 [J]. *核农学报*, 2014, 28(7): 1282-1287
- [13] 刘铁宁, 董树亭, 张吉旺, 刘鹏, 赵斌. 减源可有效调控密植玉

- 米群体光合速率、¹³C 同化物分配及籽粒产量[C]//中国作物学会. 全国青年作物栽培与生理学术研讨会论文集. 中国作物学会, 2014; 1
- [14] 范仲学, 王璞, 梁振兴. 利用同位素示踪研究夏玉米灌浆期同化产物的运转[J]. 核农学报, 2001, 15(1): 32-37
- [15] 朱庆森, 曹显祖, 骆亦其. 水稻籽粒灌浆的生长分析[J]. 作物学报, 1988, 14(3): 182-193
- [16] Shi-Liang G U, Zhu Q S, Yang J C, Peng S B. Analysis on grain filling characteristics for different rice types [J]. Acta Agronomica Sinica, 2001, 27(1): 7-14
- [17] 金亚波, 韦建玉, 屈冉, 李天福. 烤烟大田期干物质动态积累研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(14): 5830-5832
- [18] 周宝元, 孙雪芳, 丁在松, 马玮, 赵明. 土壤耕作和施肥方式对夏玉米干物质积累与产量的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(11): 2129-2140
- [19] 文熙宸, 王小春, 邓小燕, 张群, 蒲甜, 刘国丹, 杨文钰. 玉米-大豆套作模式下氮肥运筹对玉米产量及干物质积累与转运的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(3): 448-457
- [20] 陈元凯, 冯铃洋, Muhammad Ali Raza, 范元芳, 谌俊旭, 雍太文, 杨文钰, 杨峰. 四川地区玉米/大豆带状套作对大豆形态、叶绿素荧光特征及系统产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2019, 27(6): 870-879
- [21] 蒲甜. 套作高光效玉米品种的筛选和评价体系的初步建立[D]. 成都: 四川农业大学, 2016
- [22] 梁曦彤, 陆至远, 李文莹, 王宏斌, 高亚男, 王洪预, 陈勇, 吕小飞, 李秋祝, 崔金虎. 种植行距对春玉米干物质积累动态及分配规律的影响[J]. 玉米科学, 2015, 23(4): 110-116
- [23] 刘铁东, 宋凤斌. 不同宽窄行种植方式下玉米穗位叶的光合生理特征[J]. 华北农学报, 2014, 29(1): 117-121
- [24] 任永福, 陈国鹏, 蒲甜, 陈诚, 曾瑾汐, 彭霄, 马艳玮, 杨文钰, 王小春. 玉米-大豆带状种植中套作高光效玉米窄行穗位叶光合特性对弱光胁迫的响应[J]. 作物学报, 2019, 45(5): 86-97
- [25] 何冬冬, 杨恒山, 张玉芹, 刘晶, 袁雪娇. 扩行缩株对春玉米干物质积累与转运的影响[J]. 玉米科学, 2017, 25(3): 73-79
- [26] 张玉芹, 杨恒山, 高聚林, 张瑞富, 王志刚, 徐寿军, 范秀艳, 毕文波. 超高产春玉米的根系特征[J]. 作物学报, 2011, 37(4): 735-743
- [27] 戚廷香, 梁文科, 阎素红, 王俊娟, 杨兆生, 张文生. 玉米不同品种根系分布和干物质积累的动态变化研究[J]. 玉米科学, 2003, 11(3): 76-79
- [28] 徐田军, 吕天放, 赵久然, 王荣焕, 陈传永, 刘月娥, 刘秀芝, 王元东, 刘春阁. 玉米生产上 3 个主推品种光合特性、干物质积累转运及灌浆特性[J]. 作物学报, 2018, 44(3): 414-422
- [29] 张仁和, 王博新, 杨永红, 杨晓军, 马向峰, 张兴华, 郝引川, 薛吉全. 陕西灌区高产春玉米物质生产与氮素积累特性[J]. 中国农业科学, 2017, 50(12): 2238-2246
- [30] 戴明宏, 赵久然, 杨国航, 王荣焕, 陈国平. 不同生态区和不同品种玉米的源库关系及碳氮代谢[J]. 中国农业科学, 2011, 44(8): 1585-1595
- [31] 臧贺藏, 王言景, 张杰, 胡峰, 李国强, 郑国清. 不同氮肥模式下 2 个高产玉米品种物质积累与产量效益特性研究[J]. 核农学报, 2015, 29(12): 2402-2409
- [32] 王永宏, 王克如, 赵如浪, 王楷, 赵健, 王喜梅, 李健, 梁明晰, 李少昆. 高产春玉米源库特征及其关系[J]. 中国农业科学, 2013, 46(2): 257-269
- [33] 景立权, 赵福成, 刘萍, 袁建华, 陆大雷, 陆卫平. 施氮对超高产夏玉米干物质及光合特性的影响[J]. 核农学报, 2014, 28(2): 317-326
- [34] 黄智鸿, 王思远, 包岩, 梁焯赫, 孙刚, 申林, 曹洋, 吴春胜. 超高产玉米品种干物质积累与分配特点的研究[J]. 玉米科学, 2007, 15(3): 95-98
- [35] 李利利, 张吉旺, 董树亭, 刘鹏, 赵斌, 杨今胜. 不同株高夏玉米品种同化物积累转运与分配特性[J]. 作物学报, 2012, 38(6): 1080-1087

Study on Characteristics of Dry Matter Accumulation and Distribution in Maize Suitable for Intercropping System

LI Li CHEN Guopeng PU Tian MA Yanwei LUO Wanyu REN Yongfu
YANG Wenyu WANG Xiaochun *

(College of Agronomy, Sichuan Agricultural University/Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System in Southwest China,
Ministry of Agriculture/Crop Ecophysiology and Cultivation Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu, Sichuan 611130)

Abstract: In order to investigate the characteristics of dry matter accumulation and distribution of intercropped maize, the suitable maize RY 1210 (low yield reduction compared to monocropping) and unsuitable maize ZHY No.1 and ZWY 18 (great yield reduction compared to monocropping) were cultivated in intercropping and monocropping. The ^{13}C isotope tracer method was used to explore the yield, yield composition, the characteristics of dry matter accumulation and distribution of suitable intercropped maize varieties. The results showed that the yield difference of ZHY No.1 and ZWY 18 reached a significant level under the condition of intercropping and monocropping, and the two-year average yield reduction rate was 20.40%, while RY1210 had no significant difference. Compared with monocropping, the dry matter assimilation and harvest index of ZHY No.1 and ZWY 18 under the intercropping condition decreased by 21.18% and 11.24%, respectively, while that of RY1210 under the intercropping condition increased by 48.14% and 2.42%, respectively. Under the condition of intercropping, the distribution ratio of ^{13}C from ear leaf to spike in wide row was 5.96% higher than that of the narrow row, but the distribution to stem and ear leaf decreased by 5.01% and 0.13% separately. The transfer rate of ^{13}C from ear leaf to spike of was 10.90% higher than that of ZHY No.1 and ZWY 18 in narrow row, but the transfer rate of ^{13}C from ear leaf to stem of RY1210 was decreased by 8.98%. Therefore, RY 1210 can maintain higher dry matter accumulation after anthesis, improve the transport of photosynthate to grain, and significantly increase the harvest index and the soybean yield, which achieved the goal of double-high yield of maize and soybean and provide a theoretical basis for selecting and breeding the maize varieties under intercropping system.

Keywords: intercropping and monocropping, the suitable intercropping maize, dry matter transition and distribution, ^{13}C isotope tracer method