

不同栽培管理模式对带状套作玉米产量与效率的影响

任永福¹ 李嘉怡¹ 陈国鹏² 蒲甜² 陈虹² 王小春²

(¹甘肃省武威市凉州区农业技术推广中心, 733000, 甘肃武威; ²四川农业大学农学院, 611130, 四川成都)

摘要 通过分析不同栽培模式对套作玉米产量及其构成、物质积累分配、光合势、氮肥利用率、光能利用率、热量利用率的影响, 探讨不同栽培模式下套作玉米产量水平和效率的差异。在3个试点采用大田试验, 选用成单30为试验材料, 设置基础栽培(CK)、农户栽培(FC)、高产高效(HC)、超高产(SC)4种玉米—大豆套作栽培模式。结果表明, 不同栽培模式下玉米产量差异显著, SC、HC较FC分别显著增产22.49%和18.18%, 其中平昌试点增产幅度最大, 达34.72%。分析产量构成因素发现, 与FC相比, HC有效穗数和千粒重分别显著提高4.44%和4.49%; 与HC相比, SC有效穗数极显著提高18.33%, 穗粒数显著降低10.40%。干物质积累量和光合势均表现为SC>HC>FC>CK。SC茎秆和叶片干物转运贡献率均显著大于其他模式。与FC相比, HC氮肥偏生产力显著提高8.30%, 氮素利用效率提高11.37%; 资源利用率方面, SC模式光能利用率及热量利用率较FC分别显著增效11.48%和18.78%。综上所述, 3个试点中平昌增产潜力最大, 在农户栽培模式的基础上合理增加玉米种植密度, 优化施氮量统筹栽培管理, 可进一步挖掘西南地区套作玉米产量潜力, 达到增产增效的目的。

关键词 玉米—大豆带状套作; 栽培模式; 产量; 效率; 差异

玉米总产量受种植面积和单产水平的影响^[1], 在国内玉米种植面积有限的情况下, 提升玉米单产是提高玉米总产量的主要途径^[2-3]。近年来, 由于新品种和栽培技术的推广, 我国玉米单产呈现明显的增长趋势, 并陆续创造了一批高产纪录。2013年新疆奇台玉米产量达到22 676.1 kg/hm², 创下国内的春玉米高产纪录, 同年黑龙江建三江管局胜利农场创造了18 726 kg/hm²的早熟区玉米高产纪录; 2014年山东莱州登海种业的夏玉米产量达20 037 kg/hm², 创造了夏玉米高产纪录^[4], 2020年新疆奇台再次刷新国内春玉米高产纪录, 产量达到24 948.75 kg/hm²。高产纪录展示了玉米的实际产量潜力, 与之相矛盾的是差距较大的实际平均单产, 说明我国玉米增产潜力并没有得到充分挖掘^[5]。改进栽培技术和改良品种是提升玉米单产的主要途径^[6-7], 其中栽培技术的贡献达30%~50%^[8]。玉米产量的增加得益于合理的栽培管理模式^[9-10], 合理的栽培管理模式可使玉米增产11.9%^[11]。明确不同产量水平下的栽培限制因素并予以调整可以缩小玉米产量差, 优化施肥措施可协调玉米高产与环境保护的矛盾。与农户栽培模式相比, 单作玉米高产栽培模式、高产高效栽培模式显著提高了玉米籽

粒产量、有效穗数、穗位叶绿素含量、全生育期的群体光合势、氮素、磷素和钾素积累量, 穗粒数、千粒重、氮素、磷素和钾素利用效率却显著降低^[12]。有研究^[13]表明, 80 cm+40 cm宽窄行种植通过调节玉米田间配置, 改善冠层光分布及通风透光条件, 可显著提高玉米穗粒数和千粒重, 产量较等行距种植显著提高13%; 在一定范围内, 随着玉米种植密度增加, 光合速率、蒸腾速率、穗粒数和千粒重均降低, 而叶面积指数和有效穗数增加^[14]。统筹协调各栽培措施可优化玉米群体光、温、水、肥等资源效率, 是现代农业实现高产高效的有效途径。玉米—大豆带状复合种植模式作为近年国家农业农村部主推的技术模式之一, 在西南和西北地区实现了大面积推广应用^[15]。不同栽培模式下单作玉米产量与效率层次差异的研究已有较多报道, 但针对西南地区, 关于不同栽培模式对带状套作玉米产量与效率的影响缺乏研究, 不同产量水平下养分利用效率及产量限制因素尚不明确。本研究通过设置基础栽培(不施肥)、农户栽培、高产高效和超高产4种玉米—大豆带状套作栽培模式, 研究了不同栽培管理模式对带状套作玉米产量及效率的影响, 阐明其差异形成的原因, 揭示套作玉米不同产量水平下

作者简介: 任永福, 主要从事作物高产优质高效栽培理论与技术研究, E-mail: 1064428990@qq.com

王小春为通信作者, 主要从事作物高产优质高效栽培理论与技术研究, E-mail: xchwang@sicau.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0300109); 四川省科技计划项目(2021YFYZ0005)

收稿日期: 2024-03-06; 修回日期: 2024-04-24; 网络出版日期: 2025-01-13

的产量限制因素，为缩小玉米产量差距和实现套作玉米高产高效提供理论依据与技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2021–2022 年在四川南部仁寿县、中部乐至县和东北部平昌县 3 个套作玉米主产区开展。试验地气候条件见表 1（气候条件数据来源于近 5 年平均值）。

1.2 试验设计

供试玉米品种为成单 30，大豆品种为南豆 25。在同一地块设置超高产栽培（SC）、高产高效栽培（HC）、农户栽培（FC）以及基础栽培（不施肥，

表 1 试验点气候条件 Table 1 Natural conditions in text sites			
地点 Site	有效积温 Effective accumulated temperature (°C)	降水量 Rainfall (mm)	辐射量 Radiation amount (MJ/m ²)
仁寿 Renshou	2879.1	744.8	1116.4
乐至 Lezhi	2672.6	767.3	1297.4
平昌 Pingchang	2749.3	560.4	1312.2

CK）4 种栽培管理模式，采取大区设计，每种栽培模式种植面积不少于 667 m²。采用玉米—大豆带状复合种植模式，带宽 2 m，每带种植 2 行玉米和 2 行大豆，玉米宽行播种 2 行大豆，玉米、大豆窄行行距均为 40 cm，玉米、大豆间距 60 cm。试验设计见表 2，播种和收获时间见表 3。

表 2 田间试验设计 Table 2 The design of field experiment													
处理 Treatment	密度 (株/hm ²) Density (plant/hm ²)	施肥量 Fertilization rate (kg/hm ²)											其他措施 Other measures
		底肥 Basal fertilizer			苗肥 Seedling fertilizer		拔节肥 Jointing fertilizer			穗肥 Earing fertilizer			
		N	P ₂ O ₅	KCl	N	Zn	N	P ₂ O ₅	KCl	N	P ₂ O ₅	KCl	
基础栽培（不施肥）CK	52 500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	雨养为主
农户栽培 FC	52 500	120	33.6	38.4	—	—	—	—	—	120	33.6	38.4	
高产高效 HC	67 500	90	105	150	60	30	—	—	—	120	—	—	雨养为主，9 叶期喷施矮丰控高防倒
超高产 SC	67 500	150	150	225	60	30	180	33.6	38.4	150	150	225	播种前深施腐熟猪粪 1500 kg/hm ² 并翻耕，水肥一体化，9 叶期喷施矮丰控高防倒

表 3 玉米和大豆播种和收获日期 Table 3 Maize and soybean sowing and harvesting dates								月-日 month-day
年份 Year	项目 Item	仁寿 Renshou		乐至 Lezhi		平昌 Pingchang		
		玉米 Maize	大豆 Soybean	玉米 Maize	大豆 Soybean	玉米 Maize	大豆 Soybean	
2021	播种	03-30	06-11	03-28	06-10	03-26	06-08	
	收获	08-01	10-08	07-28	10-05	07-20	10-03	
2022	播种	04-09	06-16	03-28	06-11	03-21	06-10	
	收获	08-05	10-12	08-01	10-08	07-19	10-05	

1.3 测定项目与方法

1.3.1 植株干物质积累 分别在玉米苗期、拔节期、吐丝期、灌浆中期和成熟期选择 5 株能够代表小区长势的植株，分为茎、叶、苞叶、籽粒、穗轴后装袋，105 °C 条件下杀青 1 h 后，80 °C 烘干至恒重，称重。

1.3.2 产量 玉米收获前考察有效穗数，根据均重法，每小区选取 20 个果穗考察穗部性状（穗行数、行粒数、千粒重），计算产量（产量=穗数×穗粒数×千粒重/1000）。

1.3.3 植株养分含量 将成熟期干物质样品粉碎

后，采用凯氏定氮法测定样品含氮量。

1.3.4 群体光合势（LAD） 利用公式计算 LAD， $LAD[(m^2 \cdot d)/hm^2] = [(L_1 + L_2)/2] \times (t_2 - t_1)$ ，式中， L_2 和 L_1 分别为 t_2 、 t_1 时间的叶面积。

1.3.5 光能利用率（SUE）和热量利用率（HUE） 计算公式如下， $SUE(\%) = H \times Y / \Sigma Q \times 100$ ，式中， Y 为单位面积产量（kg/hm²）， H 为单位面积干物质燃烧热（J/g），取 1.779×10^7 J/kg， ΣQ 为生长期内太阳总辐射量（MJ/m²）。

$HUE = Y/T$ ，式中， T 为农作物生长期间的有效积温。

1.3.6 氮肥偏生产力（*PFP*）和氮素利用率（*GNUE*）
 $PFP\text{ (kg/kg)} = \text{施氮区产量} / \text{施氮量}$ ，
 $GNUE\text{ (kg/kg)} = \text{籽粒产量} / \text{植株吸氮量}$ 。

差异达显著水平，仁寿、乐至和平昌 3 个试验点超高产栽培、高产高效栽培、农户栽培和基础栽培 2021 和 2022 年平均产量分别为 9819.9、9149.4、7870.5、5213.7 和 9075.1、8957.5、8403.8、7196.7 及 8706.8、8511.8、6362.9、5554.7 kg/hm²，仁寿、乐至、平昌超高产栽培、高产高效栽培较农户栽培分别显著增产 24.77%、16.25%和 7.98%、6.59% 及 34.72%、31.70%，其中平昌增产潜力最大，表明与农户栽培水平相比，集成优化技术措施的高产高效栽培和超高产栽培模式分别增产 18.18%和

1.4 数据处理

采用 Excel 2010 整理数据，用 Origin 2017 作图，用 DPS 2003 分析和检验差异显著性。

2 结果与分析

2.1 不同栽培管理模式对套作玉米产量的影响

由表 4 可知，不同栽培管理模式下，玉米产量

表 4 不同栽培管理模式下玉米产量
Table 4 Yields of maize under different planting patterns

年份 Year	处理 Treatment	仁寿 Renshou			乐至 Lezhi			平昌 Pingchang		
		产量 Yield (kg/hm ²)	产量差 Yield gap		产量 Yield (kg/hm ²)	产量差 Yield gap		产量 Yield (kg/hm ²)	产量差 Yield gap	
			逐级比较 Step by step comparison	与农户比较 Compared with FC		逐级比较 Step by step comparison	与农户比较 Compared with FC		逐级比较 Step by step comparison	与农户比较 Compared with FC
2021	基础栽培	4055.8d			7205.7c			5967.4c		
	农户栽培	7594.1c	3538.3a		9305.2b	2099.5a		6372.3b	4040.9a	
	高产高效	9519.5b	1925.4b	1925.4b	10 274.2a	969.0b	969.0b	9483.2a	3110.9b	3110.9b
	超高产	10 618.3a	1098.8c	3024.2a	10 375.9a	101.7c	1070.7a	9630.1a	146.9c	3257.8a
2022	基础栽培	6371.5c			7187.6c			5141.9c		
	农户栽培	8146.9b	1775.4a		7502.3b	614.7a		6353.5b	1411.6a	
	高产高效	8779.2ab	632.3b	632.3b	7640.7a	138.4b	138.4b	7540.4a	1186.9b	1186.9b
	超高产	9021.5a	242.3c	874.6a	7774.2a	133.5c	271.9a	7783.5a	243.1c	1430.0a

不同小写字母表示达 0.05 显著水平。下同。
Different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level. The same below.

22.49%。

2.2 不同栽培管理模式对套作玉米产量构成因素的影响

由表 5 可知，2022 年仁寿农户栽培穗粒数和千粒重较基础栽培分别显著提高 9.00%和 4.44%；与农户栽培相比，高产高效栽培有效穗数和千粒重分别显著提高 4.44%和 4.49%；与高产高效栽培相比，

超高产栽培有效穗数显著提高 18.33%，穗粒数显著降低 9.48%。其他试验点表现出相同的趋势。表明增加有效穗数和穗粒数可缩小基础栽培与农户栽培水平间产量差；增加穗粒数的同时保证千粒重不减少可缩小农户栽培水平与高产高效栽培间产量差；增加有效穗数的同时保证穗粒数不减小可缩小高产高效栽培与超高产栽培之间的产量差，最终

表 5 不同栽培管理模式下玉米产量构成因素
Table 5 Yield components of maize under different planting patterns

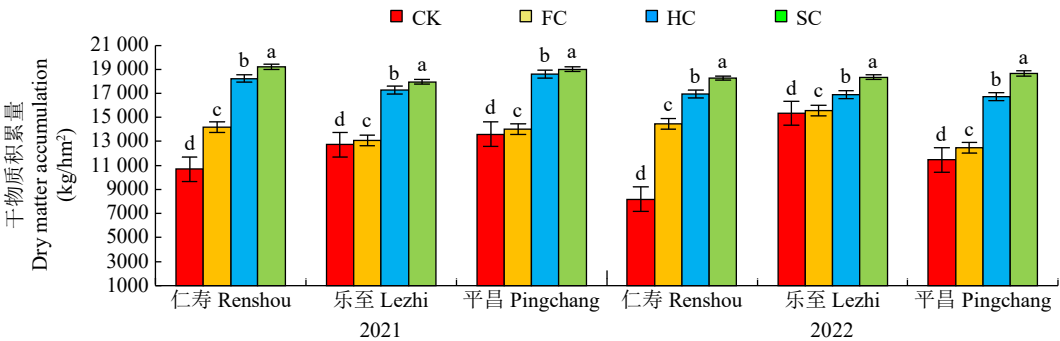
年份 Yield	处理 Treatment	仁寿 Renshou			乐至 Lezhi			平昌 Pingchang		
		有效穗数 Effective ear (×10 ³ /hm ²)	穗粒数 Grains per ear	千粒重 1000-grain weight (g)	有效穗数 Effective ear (×10 ³ /hm ²)	穗粒数 Grains per ear	千粒重 1000-grain weight (g)	有效穗数 Effective ear (×10 ³ /hm ²)	穗粒数 Grains per ear	千粒重 1000-grain weight (g)
2021	基础栽培	42.5d	356.0c	268.0c	50.7b	546.0c	260.3c	49.1b	462.0b	262.9c
	农户栽培	48.5c	507.0b	308.8a	50.0b	630.0a	295.7a	50.0b	454.0b	281.0b
	高产高效	62.5b	503.0b	302.7b	63.8a	585.0b	275.3b	66.1a	486.0a	295.2a
	超高产	66.1a	530.0a	303.2b	64.2a	585.0b	276.4b	66.4a	486.0a	298.5a
2022	基础栽培	46.0d	574.7b	240.9c	45.8c	596.2a	263.3a	45.4c	408.1c	277.5b
	农户栽培	51.7c	626.4a	251.6b	48.5bc	599.1a	258.0ab	48.1bc	476.5ab	277.3b
	高产高效	54.0b	618.4a	262.9a	51.6b	581.7ab	254.7b	48.8b	495.0a	312.3a
	超高产	63.9a	559.8b	252.2b	53.1a	552.7b	265.0a	51.4a	493.4a	306.7ab

可实现套作玉米超高产目标。

2.3 不同栽培管理模式对套作玉米干物质积累量的影响

由图 1 可知，不同栽培管理模式套作玉米干物质积累量差异达显著水平，2 年 3 个试验点均表现为超高产>高产高效>农户栽培>基础栽培。仁

寿 2 年平均数据显示，与农户栽培模式相比，高产高效栽培干物质积累量显著提高 22.86%，超高产栽培干物质积累显著提高 30.89%；超高产栽培较高产高效栽培显著提高 6.54%，表明随着产量水平的提高，干物质呈上升趋势，乐至和平昌表现出相同的趋势。



不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著，下同。
Different lowercase letters are significantly different at $P < 0.05$ level. The same below.

图 1 不同栽培管理模式下玉米干物质积累量
Fig.1 Dry matter accumulation of maize under different planting patterns

2.4 不同栽培管理模式对套作玉米干物质分配与转运的影响

由表 6 可知，不同栽培模式下套作玉米在开花期和成熟期均表现为茎秆（茎+叶鞘+雄花+穗轴）分配比率大于叶片（叶+苞叶），茎秆的干物质转运贡献率大于叶片。仁寿试验点超高产栽培茎秆干物质转运贡献率较高产高效栽培、农户栽培、基础

栽培分别显著高出 17.50%、16.31%、21.79%，乐至分别显著提高 11.12%、33.28%、37.10%，平昌分别显著提高 12.94%、17.03%、18.17%；仁寿超高产栽培叶片干物质转运贡献率分别较其他 3 个模式显著高出 57.14%、72.93%、65.34%，乐至分别高出 14.63%、18.52%、18.70%。表明超高产栽培下干物质向籽粒转运与分配的能力高于其他栽培

表 6 不同栽培管理模式下玉米干物质分配与转运
Table 6 Distribution and transport of dry matter in maize under different planting patterns %

器官 Organ	处理 Treatment	仁寿 Renshou			乐至 Lezhi			平昌 Pingchang		
		分配率 Allocation rate		转运贡献率 Transfer contribution rate	分配率 Allocation rate		转运贡献率 Transfer contribution rate	分配率 Allocation rate		转运贡献率 Transfer contribution rate
		开花期 Anthesis	成熟期 Maturation		开花期 Anthesis	成熟期 Maturation		开花期 Anthesis	成熟期 Maturation	
茎秆 Stem	基础栽培	50.37c	27.23a	8.49b	59.38a	25.50b	6.63c	50.46b	22.88b	8.20b
	农户栽培	58.14a	22.98c	8.89b	59.92a	25.92b	6.82c	54.66a	24.68a	8.28b
	高产高效	55.59b	24.46b	8.80b	54.77b	27.21a	8.18b	51.26b	23.73a	8.58b
	超高产	56.29ab	26.08a	10.34a	52.07c	22.33c	9.09a	52.67ab	23.72a	9.69a
叶 Leaf	基础栽培	49.63a	22.72a	4.79b	40.62c	17.50bc	6.47b	49.54a	20.39a	3.93b
	农户栽培	41.86c	17.62b	4.58b	40.08c	17.27c	6.48b	45.34c	15.12c	4.04ab
	高产高效	44.41b	16.97bc	5.04b	45.23b	18.92b	6.70b	48.74ab	17.22bc	4.68a
	超高产	43.71bc	15.73c	7.92a	47.93a	20.97a	7.68a	47.33b	18.58b	4.88a

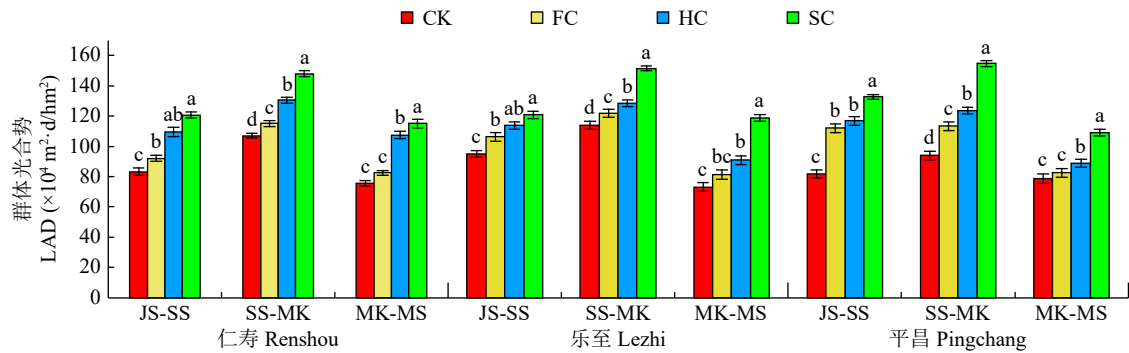
模式，有利于超高产的实现。

2.5 不同栽培管理模式对套作玉米 LAD 的影响

图 2 表明，仁寿 2 年平均数据显示，在拔节期至吐丝期，超高产栽培光合势较农户水平栽培与基

础产量栽培分别显著高 31.03%和 44.95%；在吐丝期至乳熟期，不同栽培间差异达显著水平，具体表现为超高产>高产高效>农户栽培>基础栽培；在乳熟期一完熟期，超高产栽培较高产高效栽培、农

户栽培、基础栽培栽培分别显著提高 7.07%、39.43%、51.84%；超高产栽培总光合势较其他 3 个模式分别显著提高 10.42%、32.39%、44.23%，高产高效栽培较农户栽培显著提高 57.69%，3 个生态



JS: 拔节期, SS: 吐丝期, MK: 乳熟期, MS: 完熟期。
JS: jointing stage, SS: silking stage, MK: milky stage, MS: maturation stage.

图 2 不同栽培管理模式下的套作玉米群体光合势

Fig.2 LAD of intercropping maize population under different planting patterns

区表现出相同的趋势。

2.6 不同栽培管理模式对套作玉米氮肥利用效率的影响

由表 7 可知，3 个试验点超高产栽培、高产高效栽培、农户栽培的平均氮肥偏生产力分别为 22.69、36.19、32.32 kg/kg，超高产栽培和高产高效栽培与农户栽培的效率差分别为-9.63 和

2.68 kg/kg，与农户栽培 PFP 相比，高产高效栽培增效 8.30%，超高产栽培降低 29.80%。3 个试验点超高产和高产高效栽培较农户栽培分别增加 6.14% 和 11.37%，表明超高产栽培和高产高效栽培下玉米植株吸收单位氮素生产的籽粒产量显著提高，其中高产高效栽培在集成优化现有技术后，可以显著提升 GNUE。

表 7 不同栽培管理模式下的氮肥利用效率

Table 7 Nitrogen fertilizer utilization efficiency under different planting patterns

kg/kg

地点 Site	处理 Treatment	PFP				GNUE	
		PFP	逐级比较	与农户栽培比较	GNUE	逐级比较	与农户栽培比较
			Step by step comparison	Compared with FC		Step by step comparison	Compared with FC
仁寿 Renshou	基础栽培	—			—		
	农户栽培	31.64b			32.95b		
	高产高效	35.26a	3.62a	3.62a	34.89a	1.94a	1.94a
	超高产	23.60c	-11.66b	-8.04b	34.44a	-0.45b	1.49b
乐至 Lezhi	基础栽培	—			—		
	农户栽培	38.77a			40.92b		
	高产高效	38.05a	-0.72a	-0.72a	43.32a	2.40a	2.40a
	超高产	23.06b	-14.99b	-15.71b	42.50a	-0.82b	1.58b
平昌 Pingchang	基础栽培	—			—		
	农户栽培	26.55b			31.67b		
	高产高效	35.28a	8.73a	8.73a	39.33a	7.66a	7.66a
	超高产	21.40c	-13.88b	-5.15b	35.07a	-4.26b	3.40b
平均 Average	基础栽培	—			—		
	农户栽培	32.32b			35.18b		
	高产高效	36.19a	2.68a	2.68a	39.18a	4.00a	4.00a
	超高产	22.69c	-13.39b	-9.63b	37.34a	-1.84b	2.16b

2.7 不同栽培管理模式对套作玉米 SUE 的影响

由表 8 可知，随着产量提升，套作玉米光能利用率呈递增趋势，3 个试验点超高产栽培平均光

能利用率较农户栽培显著增加 11.48%。热量是作物生长发育重要的条件之一，3 个试验点平均热量利用效率表现为超高产和高产高效栽培显著大于

农户栽培和基础栽培，逐级效率差分别为 0.69、0.08 和 0.75 kg/(hm²·°C)。超高产和高产高效栽培与农户栽培效率差分别为 0.77 和 0.08 kg/(hm²·°C)，超高产栽培较农户栽培显著增效 18.78%。由此表明，通过技术优化提高产量的过程，即是同步提高套作玉米资源利用效率的过程。

表 8 不同栽培管理模式下载作玉米光热利用效率
Table 8 SUE of intercropping maize under different planting patterns

地区 Site	处理 Treatment	SUE (%)	SUE		HUE [kg/(hm ² ·°C)]	HUE	
			逐级比较 Step by step comparison	与农户栽培比较 Compared with FC		逐级比较 Step by step comparison	与农户栽培比较 Compared with FC
仁寿 Renshou	基础栽培	1.14bc			2.27c		
	农户栽培	2.13b	0.99b		2.90b	0.63	
	高产高效	2.11b	-0.02c	-0.02b	3.12ab	0.22	0.22b
	超高产	2.31a	0.20a	0.18a	3.21a	0.09	0.31a
乐至 Lezhi	基础栽培	1.74b			4.38c		
	农户栽培	1.87ab	0.13b		4.98b	0.60	
	高产高效	1.70b	-0.17c	-0.17b	4.28c	-0.70	-0.70b
	超高产	1.97a	0.27a	0.10a	5.96a	1.68	0.98a
平昌 Pingchang	基础栽培	1.27c			3.42c		
	农户栽培	1.48b	0.21a		4.43b	1.01b	
	高产高效	1.73ab	0.25a	0.25b	5.15a	0.72c	0.72b
	超高产	1.84a	0.11b	0.36a	5.46a	0.31a	1.03a
平均 Average	基础栽培	1.38c			3.36c		
	农户栽培	1.83b	0.44a		4.10b	0.75b	
	高产高效	1.85b	0.02c	0.02b	4.18b	0.08c	0.08b
	超高产	2.04a	0.19b	0.21a	4.88a	0.69a	0.77a

3 讨论

3.1 不同栽培管理模式下载作玉米产量差形成原因

作物产量差的形成与物理因素、管理水平、经济状况以及技术推广应用程度等密切相关，各级产量差的限制因子不同^[16]。梁志英^[17]研究发现，通过增加种植密度、优化氮肥施用、采取合理的栽培方式可以使单作玉米高产高效模式、再高产模式和再高产高效模式较农户栽培模式分别增产 11.79%、37.16%、35.46%。本研究结果表明，超高产栽培较高产高效栽培显著增产 3.49%，高产高效栽培较农户栽培显著增产 22.49%，表明随着种植密度（52 500~67 500 株/hm²）和施氮量（240~450 kg/hm²）的增加，产量逐渐提高，增加密度和氮肥运筹可以缩小套作玉米产量差，提升产量。张仁和等^[18]研究表明，高产高效、超高产和再高产高效栽培春玉米穗粒数和千粒重较当地农户栽培水平有所降低；高产高效和超高产栽培有效穗数均显著大于农户栽培。本研究发现，在仁寿试点与农户栽培模式相比，高产高效栽培模式有效穗数显著提

高 4.44%，千粒重显著提高 4.49%；与高产高效栽培相比，超高产栽培有效穗数显著提高 18.33%，穗粒数显著降低 9.48%。此结果与杨吉顺等^[19]研究结果一致，随着玉米种植密度增加，玉米群体内部环境逐渐恶化，个体间竞争加剧，导致穗粒数和千粒重均显著降低，但本试验中，超高产栽培有效穗数显著大于高产高效栽培，千粒重下降不显著，表明在农户栽培基础上通过增加密度可以提高有效穗数实现高产高效，在高产高效栽培的基础上通过增密的同时增施氮肥、优化田间管理可保证穗粒数和千粒重不降低，实现超高产。

通过合理密植构建理想的叶面积指数，形成足够的群体光合势，提高玉米群体光合生产能力，可增加干物质积累量^[20]，玉米产量随着群体干物质积累量增加呈上升趋势^[21-22]。本试验条件下，超高产和高产高效栽培光合势和干物质积累量较农户栽培显著增加，并且提高了茎秆和叶片向籽粒的转运贡献率，此结果与赵杰^[12]研究结果基本一致。陈小民^[23]研究发现，单作玉米的 LAD 表现为超高产栽培>高产高效栽培>农户栽培，本试验结果与其一致，超高产栽培和高产高效栽培模式延长了 LAD

高值持续时间,提高了玉米群体光合势,有利于更多干物质积累。此外,超高产栽培模式充足的养分供应提高了花后茎秆和叶片干物质向籽粒的转运量,是获得高产的主要原因。

3.2 不同栽培管理模式下载作玉米效率差形成原因

养分利用率是体现作物养分管理是否高效合理的重要指标,施肥量、土壤状况及栽培措施均会影响养分利用率^[24-26]。刘占军等^[27]研究发现,优化施氮量不但能够维持玉米产量,还可以减少氮肥投入,提高氮肥利用率。战秀梅等^[28]研究结果表明,与农户习惯施肥方式相比,氮肥减量后移的氮肥偏生产力、氮素吸收效率显著提高。本研究结果表明,在农户栽培基础上优化施氮量和管理措施的高产高效栽培可在增产的同时,提高养分利用效率,而超高产栽培实现了增产但未增效,此结果与杨晓卡等^[29]研究结果基本一致,表明在高密条件下降低氮肥投入及优化氮肥施用时间可以提高氮肥利用效率^[30]。

光照和热量是作物生长发育的重要因素,作物产量高低主要取决于光、热资源的质量和利用率^[31-32],玉米光能利用率和产量呈显著正相关^[33]。诸多学者对间套作光能利用率做了大量的研究,肖春华等^[34]研究发现,非传统小麦套种玉米光能利用率为 1.9%,温度利用率为 100%。本试验条件下,超高产栽培光能利用率和热量利用效率均显著高于高产高效栽培和农户栽培,此结果与杨哲^[35]和赵杰^[12]研究结果一致。光能和热量利用率的增加主要是由于超高产栽培提高了光合势,增加了干物质积累量,表明在农户栽培技术基础上通过合理密植、优化养分管理等措施可提高产量和资源利用率,最终达到缩差增效的目的。

4 结论

在西南地区现有农户种植模式下,限制产量提高的可控因素主要为种植密度和施氮量。增加密度是提高套作玉米单产的重要途径,在农户栽培模式下,增密(52 500~67 500 株/hm²)的同时优化氮肥(240~450 kg/hm²)运筹,可以提高有效穗数,增加群体光合势,提高光能利用效率,同时玉米植株吸收单位氮素生产的籽粒产量显著提高,可实现产量与效率的协同增益,达到缩差增效的目的。

参考文献

- [1] 高占义,王浩.中国粮食安全与灌溉发展对策研究.水利学报,2008,39(11):1273-1277.
- [2] 李少昆,王崇桃.中国玉米生产技术的演变与发展.中国农业科学,2009,42(6):1941-1951.
- [3] 王宜伦,李潮海,谭金芳,等.超高产夏玉米植株氮素积累特征及一次性施肥效果研究.中国农业科学,2010,43(15):3151-3158.
- [4] 李少昆,赵久然,董树亭,等.中国玉米栽培研究进展与展望.中国农业科学,2017,50(11):1941-1959.
- [5] 任永福.套作超高产玉米群体结构特征研究.成都:四川农业大学,2020.
- [6] 杨锦忠,陈明利,张洪生,等.中国 1950s 到 2000s 玉米产量一密度关系的 Meta 分析.中国农业科学,2013,46(17):3562-3570.
- [7] 陈立军,唐启源.玉米高产群体质量指标及其影响因素.作物研究,2008,22(5):428-434.
- [8] Duvick D N. The contribution of breeding to yield advances in maize (*Zea mays* L.). *Advances in Agronomy*, 2005, 86(5): 83-145.
- [9] Tollenaar M, Lee E A. Yield potential, yield stability and stress tolerance in maize. *Field Crops Research*, 2002, 75(2/3): 161-169.
- [10] Tollenaar M, Deen W, Echarte L, et al. Effect of crowding stress on dry matter accumulation and harvest index in maize. *Agronomy Journal*, 2006, 98(4): 930-937.
- [11] 朴琳,任红,展茗,等.栽培措施及其互作对北方春玉米产量及耐密性的调控作用.中国农业科学,2017,50(11):1982-1994.
- [12] 赵杰.不同栽培模式对夏玉米产量差及生理特性的影响.泰安:山东农业大学,2017.
- [13] 魏珊珊,王祥宇,董树亭,等.株行距配置对高产夏玉米冠层结构及籽粒灌浆特性的影响.应用生态学报,2014,25(2):441-450.
- [14] 徐宗贵,孙磊,王浩,等.种植密度对旱地不同株型春玉米品种光合特性与产量的影响.中国农业科学,2017,50(13):2463-2475.
- [15] 任永福,陈国鹏,蒲甜,等.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.作物学报,2019,45(5):728-739.
- [16] 王崇桃,李少昆.作物产量差与玉米高产设计.科技导报,2012,30(7):50-55.
- [17] 梁志英.不同管理模式下载作玉米氮吸收与分配规律研究.太原:山西大学,2015.
- [18] 张仁和,胡富亮,杨晓钦,等.不同栽培模式对旱地春玉米光合特性和水分利用率的影响.作物学报,2013,39(9):1619-1627.
- [19] 杨吉顺,高辉远,董树亭,等.种植密度和行距配置对超高产夏玉米群体光合特性的影响.作物学报,2010,36(7):1226-1233.
- [20] 马国胜,薛吉全,路海东,等.密度与氮肥对关中灌区夏玉米(*Zea mays* L.)群体光合生理指标的影响.生态学报,2015,28(2):661-668.
- [21] 翟立普,刘巍巍,曹国军,等.不同产量水平玉米干物质积累态势研究.安徽农业科学,2010,38(30):16793-16795.
- [22] 陈国平.玉米的干物质生产与分配(综述).玉米科学,1994(1):48-53.
- [23] 陈小民.栽培模式对春玉米产量及氮素、光能和水利用效率的影响.延吉:延边大学,2018.
- [24] 王寅,高强,冯国忠,等.吉林春玉米氮磷钾养分需求与利用效率研究.植物营养与肥料学报,2018,24(2):306-315.

- [25] 刘芬, 同延安, 王小英, 等. 渭北旱塬春玉米施肥效果及肥料利用效率研究. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(1): 48-55.
- [26] 闫湘. 我国化肥利用现状与养分资源高效利用研究. 北京: 中国农业科学院, 2008.
- [27] 刘占军, 谢佳贵, 张宽, 等. 不同氮肥管理对吉林春玉米生长发育和养分吸收的影响. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(1): 38-47.
- [28] 战秀梅, 李亭亭, 韩晓日, 等. 不同施肥方式对春玉米产量、效益及氮素吸收和利用的影响. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 861-868.
- [29] 杨晓卡, 米慧玲, 高韩钰, 等. 不同栽培模式对冬小麦-夏玉米轮作系统产量、氮素累积和平衡的影响. 应用生态学报, 2016, 27(6): 1935-1941.
- [30] 任昊, 程乙, 刘鹏, 等. 不同栽培模式对夏玉米根系性能及产量和氮素利用的影响. 中国农业科学, 2017, 50(12): 2270-2281.
- [31] 程建峰, 沈允钢. 作物高光效之管见. 作物学报, 2010, 36(8): 1235-1247.
- [32] 杨国敏, 孙淑娟, 周勋波, 等. 群体分布和灌溉对冬小麦农田光能利用的影响. 应用生态学报, 2009, 20(8): 1868-1875.
- [33] 崔晓朋, 郭家选, 刘秀位, 等. 不同种植模式对夏玉米光能利用率和产量的影响. 华北农学报, 2013, 28(5): 231-238.
- [34] 肖春华, 李少昆, 刘景德, 等. 北疆非传统小麦套种玉米对资源的高效利用分析. 作物杂志, 2004(4): 12-14.
- [35] 杨哲. 栽培措施对春玉米产量差和效率差的贡献及其调控机制. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.

Effects of Different Planting Patterns on the Yield and Efficiency of Maize in Strip Intercropping System

Ren Yongfu¹, Li Jiayi¹, Chen Guopeng², Pu Tian², Chen Hong², Wang Xiaochun²

(¹Agricultural Technology Promotion Center in Liangzhou District, Wuwei 733000, Gansu, China;

²College of Agronomy, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, Sichuan, China)

Abstract This study systematically investigated the impact of various planting patterns on the yield and its components, material accumulation and distribution, photosynthetic potential, nitrogen fertilizer utilization efficiency, light energy utilization efficiency, and heat utilization efficiency of intercropping maize. The objective was to probe into the differences on yield and efficiency under different planting patterns. Field experiments were conducted at three sites by using Chengdan 30 as the experimental material, with four maize-soybean intercropping planting patterns established: basic production (CK), farmers practice (FC), high-yielding and high-efficiency cultivation (HC), super high-yielding cultivation (SC). The results revealed significant differences on the yield of maize under different cultivation patterns. SC and HC demonstrated a notable increase in yield by 22.49% and 18.18%, respectively, compared to FC, the increase in production was the largest in Pingchang site (34.72%). An analysis of yield composition factors indicated that, in comparison with FC, the effective ears of HC increased significantly by 4.44%, and the 1000-grain weight increased by 4.49%. Moreover, compared with HC, SC exhibited 18.33% increase in effective ears but 10.40% reduction in grains per spike. Dry matter accumulation and photosynthetic potential followed the order: SC > HC > FC > CK. Stem and leaf dry matter transport contributed more significantly in SC than in other cultivation models. Compared with FC, partial factor productivity of nitrogen of HC significantly increased in productivity by 8.30% and an 11.37% rise in nitrogen utilization efficiency. Regarding resource utilization efficiency, SC exhibited a significant increase in light and heat utilization efficiency by 11.48% and 18.78%, respectively, compared to FC. Among the three experimental points, Pingchang had a greater potential for yield increase. Based on the FC reasonable increase maize planting density, optimization of nitrogen application and overall cultivation management can further tap into the yield potential of intercropping maize in the southwest region, achieving the goal of increasing yield and efficiency.

Key words Maize-soybean strip intercropping; Planting patterns; Yield; Efficiency; Difference