



廖若星, 胡云, 蒲甜, 陈国鹏, 梁冰, 封亮, 杨文钰, 王小春. 密度与氮素互作对带状套作玉米产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(12): 25-38.  
LIAO Ruoxing, HU Yun, PU Tian, CHEN Guopeng, LIANG Bing, FENG Liang, YANG Wenyu, WANG Xiaochun. Effect of density and nitrogen interaction on the yield of maize in maize-soybean relay strip intercropping[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(12): 25-38.  
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2023.12.03

## 密度与氮素互作对带状套作玉米产量的影响

廖若星 胡云 蒲甜 陈国鹏 梁冰 封亮 杨文钰 王小春\*

(四川农业大学 农学院/农业农村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, 成都 611130)

**摘要** 为探究增密后对带状套作玉米产量的调控效应, 分别设置种植模式、密度、施氮量三因素裂区田间试验, 主因素为种植模式: 带状套作玉米( $A_1$ )和单作玉米( $A_2$ ), 副因素为种植密度: 60 000( $B_1$ )和 75 000 株/ $hm^2$ ( $B_2$ ), 副副因素为施氮水平: 0( $C_1$ ), 225( $C_2$ ), 300( $C_3$ ), 375  $kg/hm^2$ ( $C_4$ ), 连续 2 年的短期定位大田试验, 测定并分析各生育时期 2 种植模式下玉米的产量、干物质积累、叶面积指数及叶绿素含量。结果表明, 随着密度从 60 000 增至 75 000 株/ $hm^2$ , 单作和带状套作玉米分别增产 5.36% 和 5.87%, 带状套作玉米增产幅度较单作玉米高 8.69%; 在 2 种密度条件下, 带状套作玉米施氮量达到 300 和 375  $kg/hm^2$  时, 产量较不施氮处理增加 15.94% 和 14.28%, 单作玉米施氮量达到 225 和 300  $kg/hm^2$  时, 产量增加 18.2% 和 19.39%。带状套作玉米 2 年平均产量均显著低于单作玉米, 但密度和施氮量分别增至 75 000 株/ $hm^2$  和 375  $kg/hm^2$  后, 产量与单作间差距均有缩短。带状套作玉米在 60 000 株/ $hm^2$  和 300  $kg/hm^2$  的密氮水平下, 干物质积累量较不施氮增加了 20.3%, 叶绿素含量的增幅较单作玉米升高 42.6%, 延长了物质积累活跃生长期, 增加生长量, 可进一步挖掘产量潜力。综上, 在带状套作玉米 60 000 株/ $hm^2$  配合施氮 300  $kg/hm^2$  和 75 000 株/ $hm^2$  配合施氮 375  $kg/hm^2$  下均可获得较高的产量, 分别达 8 914.62 和 9 093.17  $kg/hm^2$ , 可使产量与单作玉米无显著差异。

**关键词** 玉米; 密度; 氮肥; 带状套作; 产量

中图分类号 S513

文章编号 1007-4333(2023)12-0025-14

文献标志码 A

## Effect of density and nitrogen interaction on the yield of maize in maize-soybean relay strip intercropping

LIAO Ruoxing, HU Yun, PU Tian, CHEN Guopeng, LIANG Bing, FENG Liang,  
YANG Wenyu, WANG Xiaochun\*

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

**Abstract** Three-factor split-zone plot field trial including planting pattern, density and nitrogen fertilization level was used to investigate the regulatory effects of increase planting density on maize yield in relay strip intercropping. The main factor was the planting pattern: Maize relay strip intercropping ( $A_1$ ) and maize monoculture ( $A_2$ ). The sub-factor was the planting density: 60 000 ( $B_1$ ) and 75 000 plants/ $hm^2$  ( $B_2$ ). The sub-sub-factor was the nitrogen fertilization level: 0 ( $C_1$ ), 225 ( $C_2$ ), 300 ( $C_3$ ), 375  $kg/hm^2$  ( $C_4$ ). A short-term locational field trial was conducted for two consecutive years to determine and analyze the maize yield, dry matter accumulation, leaf area index and chlorophyll

收稿日期: 2023-05-22

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFD2300902-02, 2022YFD1100203); 玉米新品种关键栽培技术创新与应用项目(2021YFYZ0005); 天府新区大豆玉米带状复合种植技术集成与应用项目(XZY1-03)

第一作者: 廖若星(ORCID: 0009-0001-8477-8279), 硕士研究生, E-mail: 1164404538@qq.com

通讯作者: 王小春(ORCID: 0000-0001-5845-5583), 教授, 主要从事带状复合种植玉米高产、高效栽培技术与理论研究, E-mail: xchwang@sicau.edu.cn

content of maize under the two planting patterns at each period. The results showed that: When the density increased from 60 000 to 75 000 plants/hm<sup>2</sup>, the maize yield in monoculture and intercropping increased by 5.36% and 5.87% respectively, and the maize yield increase in maize relay strip intercropping was 8.69% higher than that of maize monoculture. Under the two densities, when the application of nitrogen increases to 300 and 375 kg/hm<sup>2</sup>. The yield was increased by 15.94% and 14.28%, respectively, compared to the no nitrogen treatment. The application of nitrogen up to 225 and 300 kg/hm<sup>2</sup> of maize monoculture increased yields by 18.2% and 19.39%, respectively. The maize yield in intercropping was significantly lower than that of monoculture. However, the yield difference in maize monoculture was reduced when the planting density and N application were increased to 75 000 plants/hm<sup>2</sup> and 375 kg/hm<sup>2</sup>, respectively. The dry matter accumulation of maize in relay strip intercropping increased by 20.3% and chlorophyll content increased by 42.6% compared to maize monoculture under 60 000 plants/hm<sup>2</sup> and 300 kg/hm<sup>2</sup> nitrogen level, which prolonged the active growth period of matter accumulation and increased the growth volume, and were worth to be further exploited for their maize yield potential. In conclusion, the higher maize yield of 8 914.62 and 9 093.17 kg/hm<sup>2</sup> were obtained at the combination of 60 000 plants/hm<sup>2</sup> planting density + 300 kg/hm<sup>2</sup> nitrogen application and 75 000 plants/hm<sup>2</sup> planting density + 375 kg/hm<sup>2</sup> nitrogen application in maize relay strip intercropping, and there was no significant difference with maize monoculture yield.

**Keywords** maize; density; nitrogenous fertilizer; relay strip intercropping; yield

玉米是中国的主要粮食作物,在食品、饲料、工业原料等方面有多种用途。合理的种植密度和施氮量是提高玉米产量的重要策略<sup>[1]</sup>。随着玉米种植密度上升,1930—1960年产量每年平均增加60 kg/hm<sup>2</sup>,1960—2010年每年平均增加130 kg/hm<sup>2</sup><sup>[2-3]</sup>。已有研究发现在没有额外的氮肥投入下,密度平均每增加15 000株/hm<sup>2</sup>,中国的玉米产量可增加2.7%~10.5%<sup>[4-5]</sup>。最佳的种植密度因地区而异,取决于气候因素、土壤肥力、玉米品种、播种时期、种植模式和收获时期等<sup>[1]</sup>。我国西南地区玉米最高密度可达80 000株/hm<sup>2</sup><sup>[6]</sup>,但平均种植密度仅为48 000株/hm<sup>2</sup><sup>[7]</sup>,西南地区是我国目前玉米增密增产潜力最大的区域。

维持玉米产量的另一个关键因素是合理的氮肥施用量,玉米产量与氮施用量的最佳水平显著正相关<sup>[8]</sup>。氮不仅影响干物质的积累转运,还能增强叶片的光合能力,提高同化物向籽粒的转运<sup>[9]</sup>。籽粒氮的积累取决于吐丝后的氮吸收和营养器官的氮素再利用,根、叶甚至整个植株的氮素积累都随着种植密度的增加而增加<sup>[3]</sup>。通过增加适当的氮肥来提高粮食产量,可优化个体植物生长,协调个体与群体水平上植物生长之间的冲突<sup>[3]</sup>。缺氮会导致灌浆不充分、籽粒发育不良,穗粒数下降<sup>[10]</sup>,但过量施氮会导致作物氮素利用效率降低<sup>[11]</sup>、影响玉米生育后期营养物质消耗及各器官分配<sup>[12]</sup>。因此,优化氮肥用量对于提高玉米产量具有重要的意义。

玉米-大豆带状复合种植是在传统间套作基础

上研发出的一门适于机械化、高产出的技术<sup>[13]</sup>,连续12年被农业农村部 and 四川省遴选为主推技术,且2022年开始,农业农村部在全国进行大面积推广应用。该模式可将玉米的边际效应和大豆的固氮作用协同,高效利用光、肥资源<sup>[14]</sup>,而种间养分的竞争也提高了根系的可塑性<sup>[15]</sup>,有效提高土地当量比及肥料利用效率等<sup>[13,16]</sup>,实现“玉米不减产,增收一季豆”。要实现玉米不减产,前提是保持与单作相同的密度,已有研究发现在52 500株/hm<sup>2</sup>的密度下施氮180 kg/hm<sup>2</sup>,带状套作玉米产量可达最大<sup>[17]</sup>,该密度下单作玉米达最高产量的用氮量高于带状套作<sup>[10]</sup>。在带状套作玉米密度为75 000株/hm<sup>2</sup>时,施氮为270 kg/hm<sup>2</sup>的产量显著高于225 kg/hm<sup>2</sup>的处理<sup>[18]</sup>。目前,在西南地区玉米高产密度水平(60 000~67 500株/hm<sup>2</sup>)下,再增密后的施氮量对带状套作玉米产量影响的研究尚未见报道。本试验在西南地区玉米主要的2种模式(带状套作玉米和单作玉米)下,设置高密度水平和不同施氮量处理,测定并分析2种植植模式下各生育时期玉米的干物质积累、叶面积指数、叶绿素含量及产量等指标,旨在探究增密后带状套作玉米产量的调控效应,以期为带状套作模式玉米高产高效栽培技术提供支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点及试验地概况

试验于2019—2020年在四川省仁寿县现代农业示范基地进行。玉米生育时期的气象数据,见

表 1. 试验地土壤含有机质 8.64 g/kg, 全氮 69.85 mg/kg, 速效钾 99.00 mg/kg, 有效磷 0.73 g/kg, 全磷 0.86 g/kg, 全钾 22.42 g/kg, 碱解 7.35 mg/kg, pH 6.8。

表 1 玉米生育期气象数据

Table 1 Meteorological data during the growing seasons

年份 Year	有效积温/°C Effective accumulated temperature	降雨量/mm Precipitation	光合有效辐射/(MJ/m <sup>2</sup> ) Photosynthetic active radiation
2019	1 589.50	560.40	1 377.36
2020	1 713.40	217.60	1 676.16

## 1.2 供试材料

供试玉米为‘仲玉 3 号’, 生产中推荐的半紧凑型品种。供试大豆为‘南豆 25’, 耐荫宜带状套作品种。

## 1.3 试验设计

试验采用三因素裂区设计, 主因素为种植模式: 带状套作玉米(A<sub>1</sub>)、单作玉米(A<sub>2</sub>)。副因素为种植密度: 60 000 (生产中推荐的高产密度)(B<sub>1</sub>)、75 000 株/hm<sup>2</sup> (创高产密度)(B<sub>2</sub>)。副副因素为施氮水平: 0(C<sub>1</sub>)、225(减氮处理)(C<sub>2</sub>)、300(生产中推荐的高产施氮量)(C<sub>3</sub>)、375 kg/hm<sup>2</sup> (创高产施氮量)(C<sub>4</sub>), 共 16 个处理。均按底肥: 穗肥质量比为 3: 7 施用, 底肥配施 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 109.5 kg/hm<sup>2</sup> (12% Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 过磷酸钙)、K<sub>2</sub>O 163.5 kg/hm<sup>2</sup> (60% KCl 氯化钾)于播种时一次性施入。玉米施肥模拟机械化施肥, 距离种子 15 cm 处开沟施肥, 其中带状套作在窄行开沟施肥。玉米于 2019 年 3 月 31 日播种, 8 月 1 日收获, 大豆在 6 月 20 日播种, 11 月 1 日收获; 2020 年玉米于 4 月 5 日播种, 8 月 3 日收获, 大豆在 6 月 20 日播种, 11 月 1 日收获。带状套作生产单元为 2.0 m, 玉豆行比 2: 2, 间距 0.6 m, 玉米、大豆行距均为 0.4 m, 带长 10.0 m。单作按照 0.7 m 等行距种植, 带长 10.0 m。采用 2 年短期定位试验方式。大豆种植密度为 120 000 株/hm<sup>2</sup>, 全生育期不施肥, 其他管理同大田。

## 1.4 测定项目及方法

### 1.4.1 干物质积累转运

于玉米吐丝期(R<sub>1</sub>)、成熟期(R<sub>6</sub>)选取生长发育一致、健康的 5 株植株, 按不同器官分开后在 105 °C 下杀青 1 h, 80 °C 烘干至恒重, 称取干物质重, 计算花前干物质转运量、花后同化量。并采用 Logistic

方程通过回归分析拟合玉米地上干物质积累动态。

### 1.4.2 叶面积指数

于玉米拔节期(V<sub>6</sub>)、大喇叭口期(V<sub>12</sub>)、吐丝期(R<sub>1</sub>)、吐丝期后 20 d(R<sub>1</sub>+20)、成熟期(R<sub>6</sub>)测定叶面积, 然后计算叶面积指数。

### 1.4.3 叶绿素含量

2019 年于玉米拔节期(V<sub>6</sub>)、吐丝期(R<sub>1</sub>)、吐丝后 15 d(R<sub>1</sub>+15)、吐丝后 30 d(R<sub>1</sub>+30)测定叶绿素含量, 2020 年于玉米拔节期(V<sub>6</sub>)、大喇叭口期(V<sub>12</sub>)、吐丝期(R<sub>1</sub>)、吐丝后 20 d(R<sub>1</sub>+20)测定, 采用丙酮-乙醇提取法。

### 1.4.4 产量及产量构成因素

玉米于成熟期收获前考察有效穗, 统计有效穗, 小区实收折算实际产量, 根据均重法每小区另选取 20 个果穗考察穗部性状(穗粒数和千粒重)。

## 1.5 数据分析

试验数据采用 Excel 2019 进行试验数据的汇总及整理, 并用 SPSS 22.0 进行统计分析, Origin 2022 作柱状图。

## 2 结果与分析

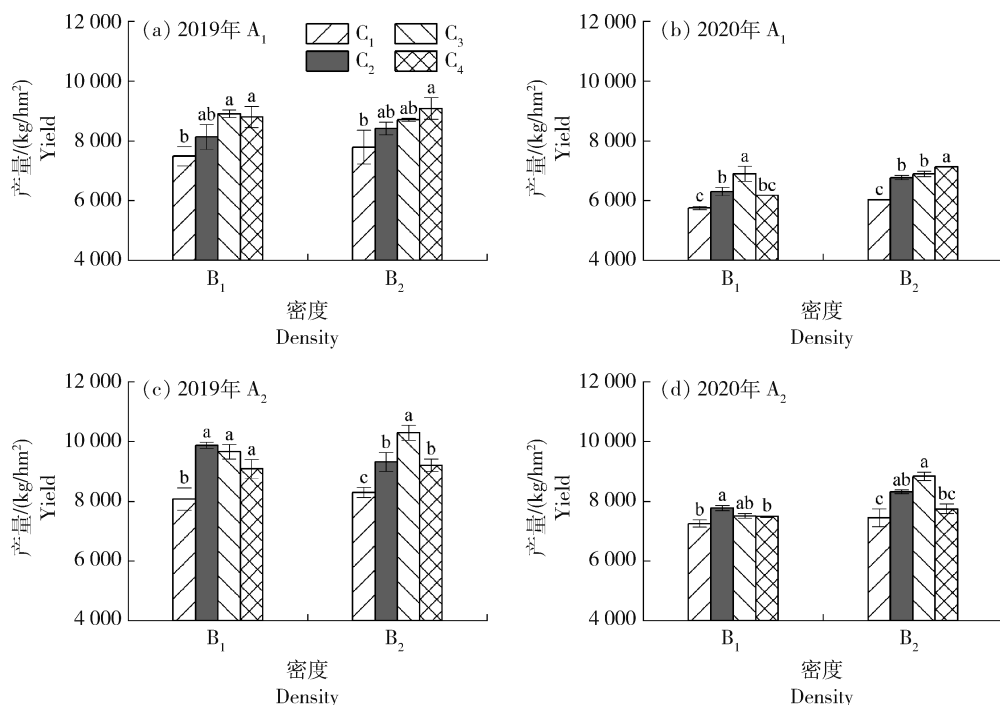
### 2.1 密氮互作对不同种植模式玉米产量及产量构成因素的影响

#### 2.1.1 产量

由图 1 可知, 带状套作(A<sub>1</sub>)和单作(A<sub>2</sub>)2 种模式下玉米产量差异达显著水平, 2019 和 2020 年单作玉米产量较带状套作玉米分别高 9.65% 和 16.58%。随着种植密度由中密度(B<sub>1</sub>)增加至高密度(B<sub>2</sub>), 带状套作和单作玉米分别增产 5.87% 和 5.36%, 且 A<sub>1</sub> 增幅较 A<sub>2</sub> 高 8.69%。随着施氮量的增加, B<sub>1</sub> 的 A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub> 均呈先增后减趋势, 分别在施氮

量  $300 \text{ kg/hm}^2$  ( $C_3$ )和施氮量  $225 \text{ kg/hm}^2$  ( $C_2$ )达最大值, $B_2$ 的  $A_1$  则呈增加趋势,在施氮量  $375 \text{ kg/hm}^2$  ( $C_4$ )达最大值;2019年, $C_2$ 的  $A_2$  较  $A_1$  在  $B_1$  和  $B_2$  下的产量分别高  $21.3\%$ 和  $10.71\%$ ,而随着施氮量的增加, $A_1$  与  $A_2$  间产量差距逐渐缩小, $A_1$  在  $B_1$ 、 $B_2$  均与  $A_2$  差异不显著,较  $C_2$  的产量差距缩小  $60.61\%$ 、 $88.14\%$ ,进一步降低了与  $A_2$  的产量差距; $B_1$  和  $B_2$  的  $A_1$  产量较同密度下的不施氮

( $C_1$ )分别升高  $15.94\%$ 和  $14.28\%$ , $A_2$  则分别升高  $18.2\%$ 和  $19.39\%$ 。2020年变化趋势与2019年一致,2020年产量水平显著低于2019年,可能是干旱所致。综上,带状套作要获得玉米最大的产量,在中( $B_1$ )、高密度( $B_2$ )下施氮量均高于单作玉米  $75 \text{ kg/hm}^2$ ,这可能与2种模式下玉米根系所占空间不同而导致的根系吸收能力差异有关。



$A_1$ 、 $A_2$  分别为带状套作玉米和单作玉米; $B_1$ 、 $B_2$  分别为种植密度  $60\ 000$  和  $75\ 000$  株/ $\text{hm}^2$ ; $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_4$  分别为施氮量  $0$ 、 $225$ 、 $300$ 、 $375 \text{ kg/hm}^2$ 。不同小写字母表示在同一模式和同一密度下不同施氮处理在  $0.05$  水平上差异显著。下同。

$A_1$  and  $A_2$  are maize relay strip intercropping and maize monoculture, respectively;  $B_1$  and  $B_2$  are planting density of  $60\ 000$  and  $75\ 000$  plants/ $\text{hm}^2$ , respectively; and  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ , and  $C_4$  are nitrogen fertilization level of  $0$ ,  $225$ ,  $300$ , and  $375 \text{ kg/hm}^2$ , respectively. Different small letters indicate significant differences between the different nitrogen treatments at the  $0.05$  level for the same pattern and at the same density. The same below.

图1 密氮交互下玉米产量的变化

Fig. 1 Changes in maize yield under density and nitrogen interaction

### 2.1.2 产量构成因素

由表2和表3可知,种植模式、密度和施氮量对有效穗、穗粒数影响均达显著水平。种植密度由中密度( $B_1$ )增加至高密度( $B_2$ ),可显著增加有效穗,2019年带状套作玉米( $A_1$ )、单作玉米( $A_2$ )的有效穗增幅分别为  $13.2\%$ 、 $17.87\%$ ,2020年增幅分别为  $15.7\%$ 、 $14.65\%$ 。 $B_1$ 的  $A_2$  有效穗、穗粒数、千粒重均随着施氮量的增加呈先增后降低的趋势, $B_2$ 中  $A_1$  的有效穗则呈增加趋势,但  $A_1$ 、 $A_2$  的有效穗、千粒重间差异均不显著。因此, $A_1$  较  $A_2$  产量低的

原因主要在于穗粒数的差异,2019和2020年  $A_2$  穗粒数较  $A_1$  分别高  $5.05\%$ 和  $20.82\%$ ,这可能是2020年  $A_1$  产量较2019年降幅高于  $A_2$  的原因。2019年  $B_1$  的  $A_1$ 、 $A_2$  穗粒数分别在  $C_3$ 、 $C_2$  达最大值。

## 2.2 密氮交互对不同种植模式玉米干物质积累转运的影响

### 2.2.1 干物质积累量

由图2可知,种植模式、密度和施氮量对玉米各生育时期干物质积累影响显著,2019和2020年单作

表 2 密氮互作下玉米产量构成因素

Table 2 Yield components of maize under density and nitrogen interaction

年份 Year	种植密度 Planting density	施氮量 Nitrogen application	有效穗/(穗/hm <sup>2</sup> ) Effective spike		穗粒数 Grain per spike		千粒重/g Thousand grain weight	
			A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>
2019	B <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	54 761.90 b	56 785.71 b	494.53 b	550.05 a	276.62 a	258.74 b
		C <sub>2</sub>	55 952.38 ab	58 928.57 a	508.43 ab	558.22 a	286.05 a	300.27 a
		C <sub>3</sub>	56 666.67 a	58 571.42 a	543.85 a	555.73 a	287.18 a	293.57 a
		C <sub>4</sub>	56 904.76 a	55 714.28 c	538.74 ab	555.39 a	289.46 a	297.07 a
		平均值 Average	56 071.43 A	57 500.00 A	521.39 B	554.85 A	284.83 A	287.41 A
	B <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	61 956.53 d	69 775.00 ab	463.98 a	463.33 b	266.13 a	256.67 b
		C <sub>2</sub>	63 158.46 c	69 743.24 ab	466.33 a	478.03 ab	278.61 a	281.56 a
		C <sub>3</sub>	65 081.54 b	71 094.59 a	471.45 a	514.22 a	278.62 a	279.79 a
		C <sub>4</sub>	68 446.92 a	69 405.41 b	478.47 a	480.61 ab	284.71 a	276.17 a
		平均值 Average	64 660.86 B	70 004.56 A	470.06 A	484.05 A	277.02 A	273.55 A
2020	B <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	56 196.43 a	55 080.71 a	410.03 b	523.21 a	256.89 a	261.30 b
		C <sub>2</sub>	57 321.43 a	56 198.54 a	424.41 b	527.16 a	259.51 a	262.67 b
		C <sub>3</sub>	57 241.07 a	55 044.39 a	456.95 a	501.95 b	263.89 a	277.69 a
		C <sub>4</sub>	57 107.16 a	57 078.29 a	377.59 c	517.22 a	265.21 a	267.06 ab
		平均值 Average	56 966.52 A	55 850.48 A	417.25 B	517.39 A	261.38 A	267.18 A
	B <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	64 938.38 b	66 482.84 a	374.48 bc	473.81 b	248.09 b	236.67 b
		C <sub>2</sub>	67 605.63 a	67 075.16 a	395.36 a	499.9 a	256.13 a	255.83 a
		C <sub>3</sub>	68 609.16 a	66 789.22 a	381.27 b	506.08 a	259.22 a	261.02 a
		C <sub>4</sub>	69 278.17 a	61 805.55 b	363.46 c	471.81 b	261.87 a	256.54 a
		平均值 Average	67 607.84 A	65 538.19 A	378.64 B	487.90 A	256.33 A	252.52 A

注：大写字母表示在同一密度下 2 种模式在 0.01 水平上差异显著。下同。

Note: Capital letters indicate significant differences between the two patterns at the 0.01 level for the same density. The same below.

玉米 (A<sub>2</sub>) 干物质积累较带状套作 (A<sub>1</sub>) 分别高 5.61% 和 11.01%。密度由中密度 (B<sub>1</sub>) 增加至高密度 (B<sub>2</sub>)，A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub> 的干物质积累均显著增加，2019 和 2020 年 A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub> 增幅分别为 14.81%、15.26%。三因素互作对干物质积累量的影响显著，表现为 A<sub>1</sub> 在 B<sub>2</sub> 干物质积累随施氮量的增加呈增加趋势，B<sub>1</sub> 则随施氮量呈先增后减趋势，均在 C<sub>3</sub> 达最大值，

A<sub>1</sub>B<sub>1</sub>C<sub>3</sub> 较不施氮的增幅为 20.3%；A<sub>2</sub> 的干物质积累量在 B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub> 下均随施氮量的增加呈先增后减趋势，分别在 B<sub>1</sub>C<sub>2</sub>、B<sub>2</sub>C<sub>3</sub> 达最大值，较不施氮分别增加 24.96%、22.12%。施氮量由低到高，A<sub>1</sub> 与 A<sub>2</sub> 的干物质积累的差距逐渐缩小，A<sub>1</sub> 的干物质在 B<sub>1</sub>C<sub>3</sub>、B<sub>2</sub>C<sub>4</sub> 与 A<sub>2</sub> 间差异在同水平下均不显著。因此，带状套作模式增密增氮对玉米各生育时期干物质



表3 密氮互作对玉米产量及产量构成因素的方差分析  
Table 3 Variance analysis of density and nitrogen interaction on the yield and yield components of maize

年份 Year	因子 Factor	产量/ (kg/hm <sup>2</sup> ) Yield	有效穗/ (穗/hm <sup>2</sup> ) Effective spike	穗粒数 Grain per spike	千粒重/g Thousand grain weight
2019	A	**	**	**	ns
	B	ns	**	**	**
	C	**	**	*	**
	A×B	ns	**	ns	ns
	A×C	*	**	ns	ns
	B×C	ns	**	ns	ns
	A×B×C	ns	**	ns	ns
2020	A	**	**	**	ns
	B	**	**	**	**
	C	**	ns	**	**
	A×B	ns	ns	ns	*
	A×C	**	*	**	ns
	B×C	ns	ns	ns	ns
	A×B×C	**	**	**	ns

注：\* 表示在 0.05 水平上差异显著；\*\* 表示在 0.01 水平上差异显著；ns 表示差异不显著。下同。

Note: \* means significant at the 0.05 probability level; \*\* means significant at the 0.01 probability level; ns means the difference is not significant. The same below.

积累量的调控效应要高于单作。但吐丝期( $R_1$ )在  $B_1$ 、 $B_2$  密度水平下,2 年  $C_1$  的  $A_2$  干物质分别较  $A_1$  低 9.41%、4.18%(2019 年)和 9.22%、23.64%(2020 年),因此,在中、高密度( $B_1$ 、 $B_2$ )条件下,进一步增施氮肥可使带状套作玉米干物质积累量均优于单作玉米。

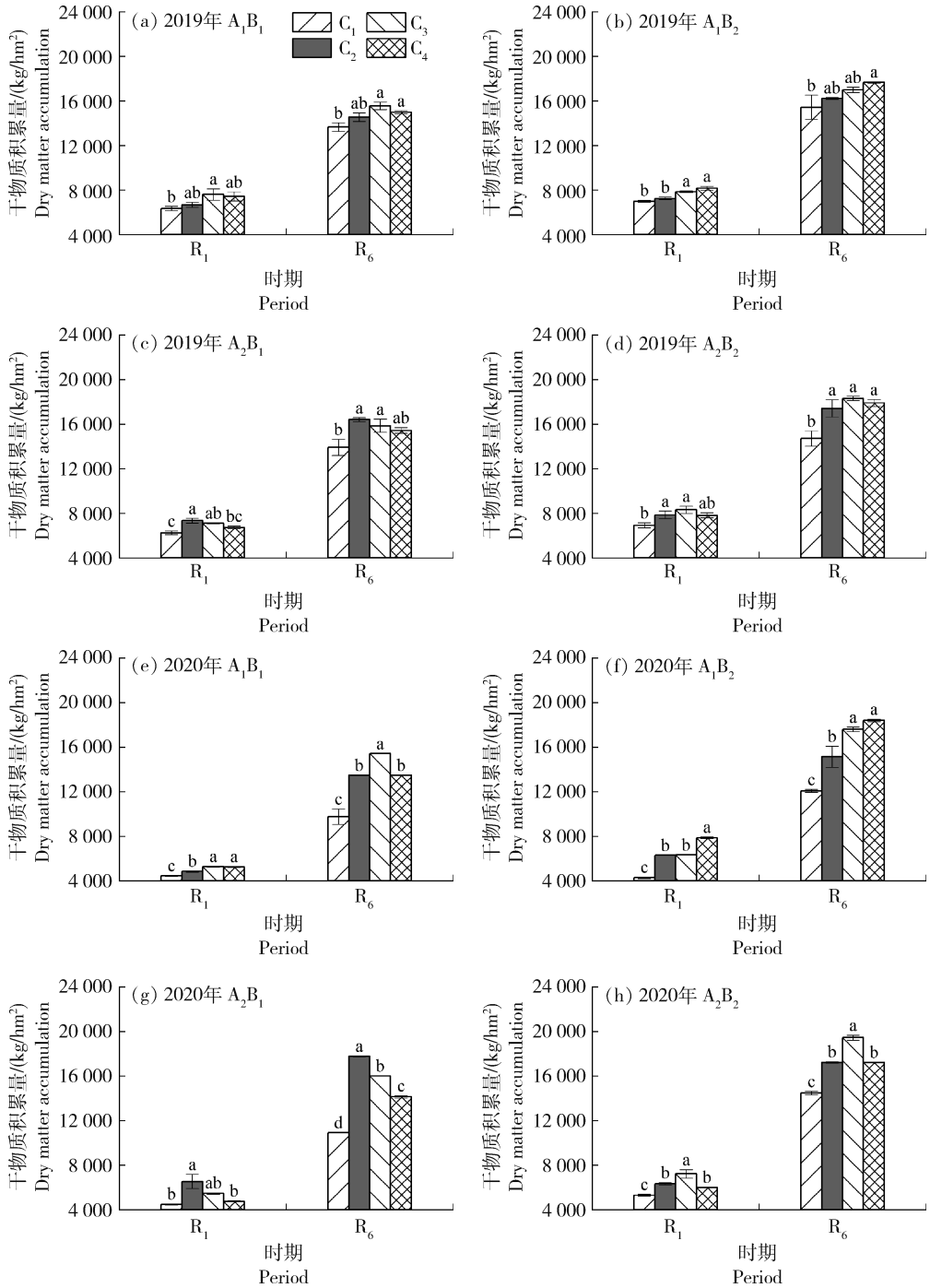
### 2.2.2 干物质积累特征参数

由表 4 可知,不同处理下玉米干物质积累进程的拟合方程决定系数( $R^2$ )均 $>0.93$ ,表明玉米干物质积累量( $y$ )与生育期( $x$ )能较好地拟合。带状套作玉米( $A_1$ )的最大生长速率和平均生长速率较单作玉米( $A_2$ )低 23.7%和 23.81%,但  $A_1$  达到最大生长速率时的生长量和活跃生长期分别较  $A_2$  增加 24.74%和 37.23%。种植密度从  $B_1$  增至  $B_2$ , $A_1$  各指标表现为上升趋势,而  $A_2$  的最大生长速率、平均生长速率均表现出下降趋势外,其他指标变化与  $A_1$  一致。随着施氮量的增加, $A_1$ 、 $A_2$  各指标均表现出

先增后减的变化趋势,2 种密度下  $A_1$  最大生长速率和平均生长速率均在  $C_3$  达最大值,与  $A_2$  差异不显著,且  $B_2$  的  $A_1$  在  $C_3$  施氮量的最大生长速率和平均生长速率均高于  $A_2$ 。因此,中、高密度( $B_1$ 、 $B_2$ )下对带状套作玉米合理增施氮肥可有效地提高玉米生长速率。

### 2.2.3 干物质积累及转运

由表 5 和表 6 可知,单作玉米( $A_2$ )花后同化量均显著高于带状套作玉米( $A_1$ ),2 种模式花前转运量、花前贡献率的差异均不显著,因此单作玉米较带状套作产量高的原因可能是  $A_2$  的花后同化量显著高于  $A_1$ 。 $A_1$  花后同化量较  $A_2$  低 8.89%。密度由中密( $B_1$ )增至高密( $B_2$ ), $A_1$  和  $A_2$  的花后同化量增幅分别为 12.86%和 9.32%, $A_1$  增幅较  $A_2$  高 27.53%。随施氮量的增加,花后同化量  $B_2$  的  $A_1$  和  $A_2$  呈增加趋势,其他均呈先增后降趋势, $A_1$  花



R<sub>1</sub>, 吐丝期; R<sub>6</sub>, 成熟期。下同。

R<sub>1</sub>, silking stage; R<sub>6</sub>, mature stage. The same below.

图 2 密氮互作下玉米干物质积累量的变化

Fig. 2 Changes in dry matter accumulation of maize under density and nitrogen interaction

后同化量随着施氮量的增加与 A<sub>2</sub> 差距逐渐减小, 且 A<sub>1</sub> 的 B<sub>1</sub>C<sub>3</sub> 和 B<sub>2</sub>C<sub>4</sub> 与 A<sub>2</sub> 差异均不显著。

### 2.3 密氮互作对不同种植模式玉米叶面积指数的影响

由图 3 可知, 不同种植模式、密度、施氮量互作

对玉米叶面积指数影响均显著。密度由中密度(B<sub>1</sub>)增加至高密度(B<sub>2</sub>), A<sub>1</sub> 的叶面积指数增幅为 15.96%, A<sub>2</sub> 为 14.62%, 且 A<sub>1</sub> 较 A<sub>2</sub> 增幅高 8.4%。随着施氮量的增加, 除 B<sub>2</sub> 的 A<sub>1</sub> 呈增加趋势外, 其余均呈先增后减趋势, B<sub>1</sub> 的 A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub> 分别在 C<sub>3</sub>、C<sub>2</sub> 达最大

表 4 2020 年密氮互作下玉米单株生长率的 Logistic 方程回归分析  
Table 4 Logistic regression analysis of maize growth rate regulated by density and nitrogen interaction in 2020

种植模式 Planting pattern	种植密度 Planting density	施氮量 Nitrogen application	方程 Equation	$R^2$	达到最大 生长速率的 时间/d $T_{\max}$	达到最大 生长速率时 的生长量/ (g/(株·d)) $W_{\max}$	最大生长 速率/ (g/(株·d)) $G_{\max}$	平均生长 速率/ (g/(d·株)) $G_{\text{mean}}$	活跃生 长期/d $D$
A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	$y=214.92/(1+65.93e^{-0.05x})$	0.969 2	85.39	107.48	2.64	1.76	122.32
		C <sub>2</sub>	$y=379.79/(1+86.41e^{-0.04x})$	0.983 3	103.65	189.89	4.08	2.72	139.47
		C <sub>3</sub>	$y=315.84/(1+179.74e^{-0.06x})$	0.945 2	84.75	157.92	4.84	3.22	97.94
		C <sub>4</sub>	$y=302.90/(1+104.99e^{-0.05x})$	0.989 9	90.23	151.45	3.91	2.60	116.32
	B <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	$y=288.24/(1+110.92e^{-0.05x})$	0.983 6	101.88	144.12	3.33	2.22	129.81
		C <sub>2</sub>	$y=331.56/(1+86.47e^{-0.05x})$	0.987 7	98.80	165.78	3.74	2.49	132.92
		C <sub>3</sub>	$y=795.49/(1+106.53e^{-0.03x})$	0.972 8	136.82	397.75	6.79	4.52	175.85
		C <sub>4</sub>	$y=417.93/(1+62.24e^{-0.04x})$	0.965 5	101.52	208.96	4.25	2.83	147.46
A <sub>2</sub>	B <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	$y=196.19/(1+406.08e^{-0.08x})$	0.943 7	76.85	98.09	3.83	2.56	76.77
		C <sub>2</sub>	$y=329.84/(1+279.11e^{-0.07x})$	0.973 3	81.82	164.92	5.68	3.78	87.17
		C <sub>3</sub>	$y=288.51/(1+695.84e^{-0.08x})$	0.966 5	81.08	144.25	5.82	3.88	74.33
		C <sub>4</sub>	$y=256.01/(1+604.00e^{-0.08x})$	0.937 0	80.22	128.00	5.11	3.41	75.16
	B <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	$y=207.68/(1+663.59e^{-0.08x})$	0.940 9	78.60	103.84	4.29	2.86	72.58
		C <sub>2</sub>	$y=250.91/(1+426.04e^{-0.07x})$	0.976 7	81.00	125.46	4.69	3.13	80.27
		C <sub>3</sub>	$y=302.13/(1+139.16e^{-0.06x})$	0.960 9	83.39	151.06	4.47	2.98	101.37
		C <sub>4</sub>	$y=260.93/(1+216.21e^{-0.07x})$	0.952 5	82.53	130.46	4.25	2.83	92.11



表 5 2019 年密氮互作下玉米干物质积累转运

Table 5 The accumulation and transport of dry matter in maize under density and nitrogen interaction in 2019

密度 Planting density	施氮量 Nitrogen application	花前转运量/(kg/hm <sup>2</sup> )		花前贡献率/%		花后同化量/(kg/hm <sup>2</sup> )	
		Pre anthesis transport		Pre anthesis contribution rate		Post flower assimilation	
		A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>
B <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	993.49 c	966.15 b	13.78 a	13.00 ab	5 612.95 b	6 013.21 a
	C <sub>2</sub>	1 118.24 c	1 533.27 a	16.15 a	19.95 a	6 163.53 ab	7 196.48 a
	C <sub>3</sub>	1 714.99 a	1 002.15 b	20.21 a	14.66 ab	6 654.62 a	7 088.62 a
	C <sub>4</sub>	1 394.81 b	1 001.10 b	18.26 a	12.60 b	5 998.63 b	7 086.64 a
	平均值 Average	1 305.38 A	1 125.67 A	17.10 A	15.05 A	6 107.43 A	6 846.24 A
B <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	1 179.55 a	1 094.26 a	14.08 a	14.27 a	5 691.90 b	6 131.85 b
	C <sub>2</sub>	1 252.87 a	1 386.70 a	16.28 a	15.28 a	7 259.93 a	7 742.65 ab
	C <sub>3</sub>	1 389.66 a	1 564.71 a	17.55 a	20.69 a	7 381.38 a	8 045.25 a
	C <sub>4</sub>	1 667.73 a	1 366.71 a	20.68 a	14.72 a	7 701.21 a	8 280.09 a
	平均值 Average	1 372.45 A	1 353.10 A	17.15 A	16.24 A	7 008.61 A	7 549.96 A

表 6 2019 年密氮互作对玉米干物质积累转运的方差分析

Table 6 Variance analysis of density and nitrogen interaction on dry matter accumulation and transport in maize in 2019

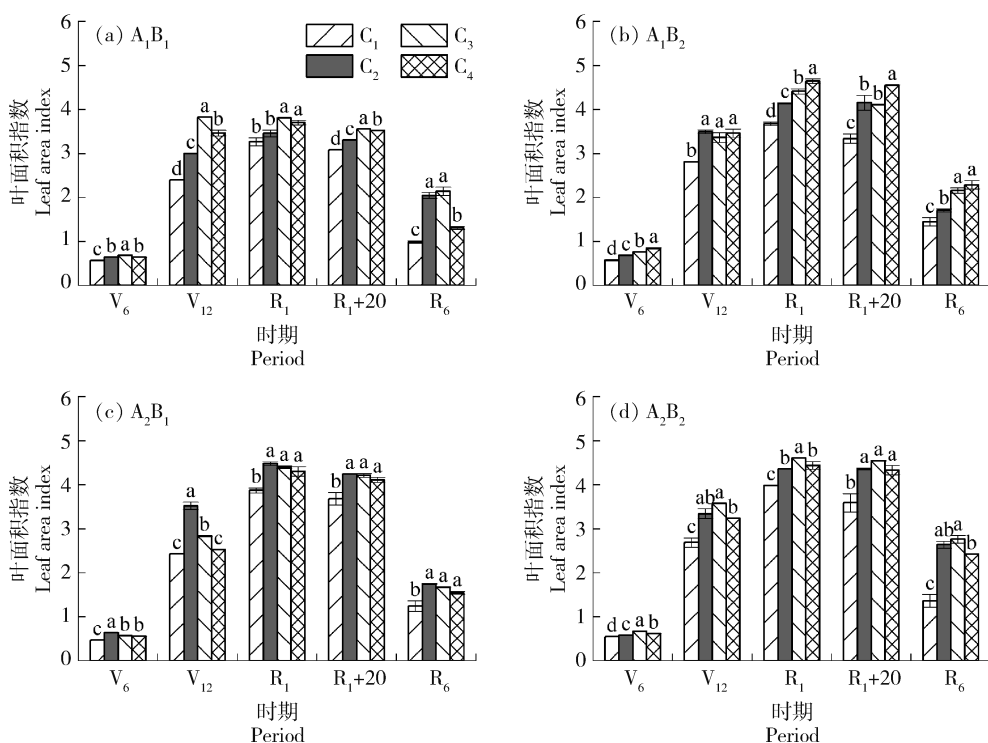
因子 Factor	花前转运量/(kg/hm <sup>2</sup> ) Pre anthesis transport	花前贡献率/% Pre anthesis contribution rate	花后同化量/(kg/hm <sup>2</sup> ) Post flower assimilation
A	ns	ns	ns
B	ns	ns	**
C	ns	ns	*
A×B	ns	ns	ns
A×C	ns	ns	ns
B×C	ns	ns	ns
A×B×C	ns	ns	ns

叶面积指数, B<sub>2</sub> 的 A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub> 分别在 C<sub>4</sub>、C<sub>3</sub> 达最大叶面积指数。在玉米生长发育的后期, B<sub>1</sub> 的叶面积指数 A<sub>1</sub> 较 A<sub>2</sub> 低 14.49%, 但密度增至 B<sub>2</sub>, 则 A<sub>1</sub> 较 A<sub>2</sub> 高 5.22%。

#### 2.4 密氮互作对不同种植模式玉米叶绿素含量的影响

由图 4 可知, 种植模式、密度和施氮量对玉米各生育时期的叶绿素含量影响显著。2 年的叶绿素含

量 A<sub>2</sub> 均比 A<sub>1</sub> 高, 但密度由中密度(B<sub>1</sub>)增加至高密度(B<sub>2</sub>), A<sub>1</sub> 与 A<sub>2</sub> 叶绿素含量的差距降低, 在 2019 年, 相较于 B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub> 密度下 A<sub>1</sub> 与 A<sub>2</sub> 间差距缩小 20.04%, 2020 年较 B<sub>1</sub> 差距降低 15.84%。玉米叶绿素含量随施氮量的增加均呈先增后降趋势, B<sub>1</sub> 的 A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub> 最高叶绿素含量分别出现在 C<sub>3</sub>、C<sub>2</sub>, 与 C<sub>4</sub> 相比, 2019 年 A<sub>1</sub> 较 A<sub>2</sub> 增幅高 31.17%, 2020 年高



V<sub>6</sub>, 拔节期; V<sub>12</sub>, 大喇叭口期; R<sub>1</sub>+20, 吐丝期后 20 d; R<sub>6</sub>, 成熟期。

V<sub>6</sub>, elongation stage; V<sub>12</sub>, big trumpet stage; R<sub>1</sub>+20, 20 d after silking stage; R<sub>6</sub>, mature stage.

图3 2020年密氮互作下玉米叶面积指数的变化

Fig. 3 Changes in leaf area index of maize under density and nitrogen interaction in 2020

42.6%。B<sub>2</sub>的A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>最高叶绿素含量分别为C<sub>4</sub>、C<sub>3</sub>处理,与不施氮相比2019年A<sub>1</sub>较A<sub>2</sub>增幅高13.78%,2020年高24.8%。

## 2.5 密氮互作对不同种植模式下玉米产量相关性分析

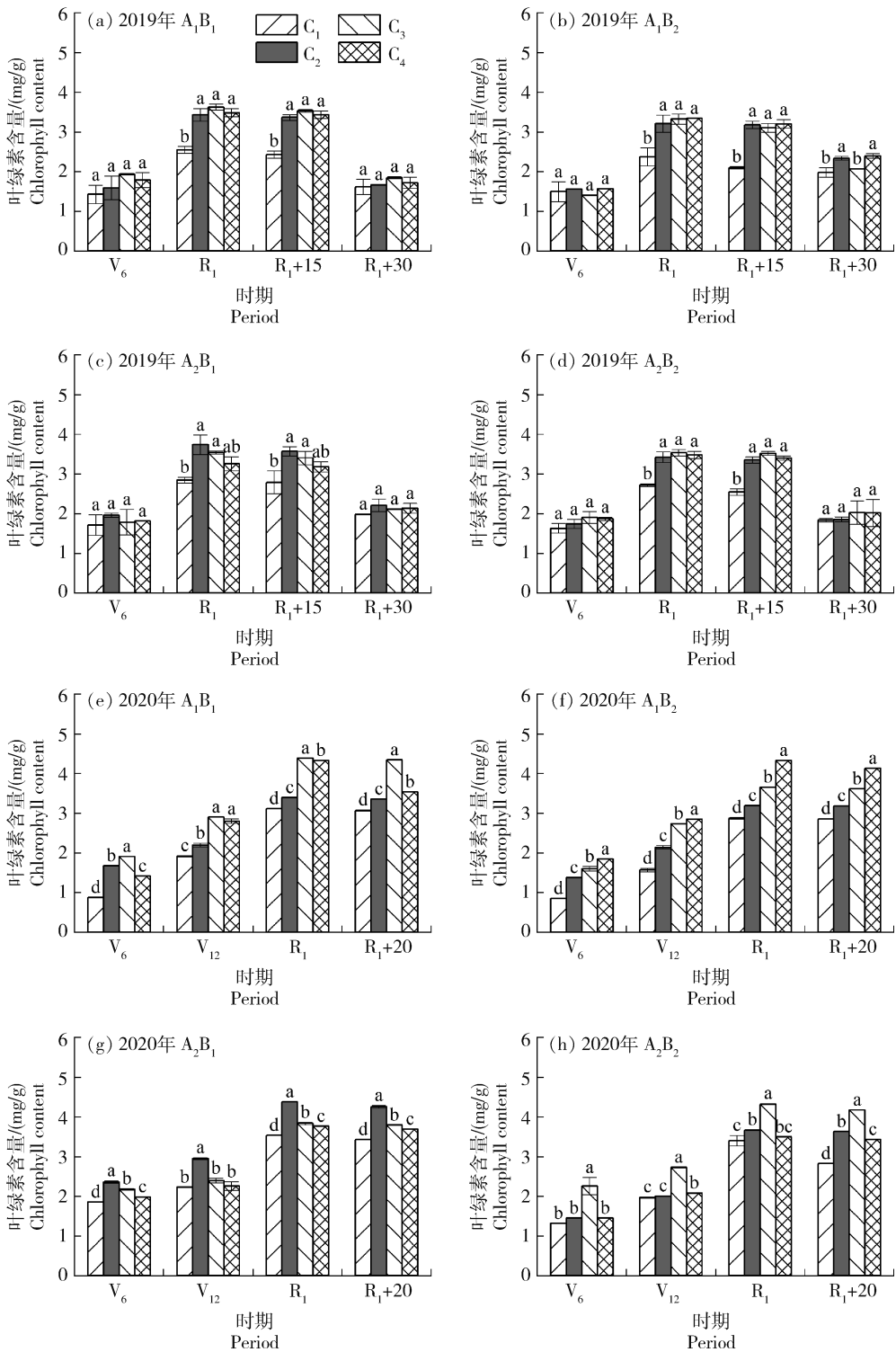
由表7可知,带状套作玉米的产量与千粒重呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),与有效穗呈显著正相关( $P < 0.05$ )。单作玉米的产量与千粒重呈显著正相关( $P < 0.05$ )。2种模式下的玉米产量与干物质积累量、叶面积指数、叶绿素含量均呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),其中与干物质积累量的相关系数( $r$ )最高,带状套作玉米、单作玉米分别达0.84、0.86,说明玉米产量受干物质积累量、叶面积指数和叶绿素含量的影响均达显著水平。

## 3 讨论

### 3.1 密度与氮素互作对玉米产量及相关特性的影响

合理的种植密度和施氮量是影响玉米产量的重要技术途径<sup>[19]</sup>。在本试验中,相同种植模式和施氮量下,随着密度的提高,叶绿素含量、穗粒数和千粒

重下降,干物质积累、叶面积指数和有效穗均上升,且有效穗的上升大于穗粒数和千粒重的下降之和,因此,可使产量提高,这与Gao等<sup>[20]</sup>研究结果一致。但在密度增加后,水分和养分的分配减少,植株竞争加剧,要使产量仍达较高水平则需要增加氮肥的施用量,对此,Liu等<sup>[21]</sup>研究发现,玉米在吐丝期后利用土壤氮的能力降低,而氮肥的施用可直接提高土壤中可利用氮的含量<sup>[22]</sup>,当种植密度过高时,需要更充足的氮来补充玉米在灌浆期间的养分吸收,缓解植株间对养分的竞争。种植密度通过群体效应对叶面积产生影响,而施氮量则是通过改变叶片结构而影响叶面积<sup>[23]</sup>,已有研究发现增加氮肥施用量能有效增加玉米穗位及以上叶片的绿叶面积<sup>[24]</sup>,再者氮素在叶片中的积累可延缓叶片衰老、增加持绿期<sup>[25]</sup>,进而提高玉米光合速率。光合速率是影响干物质积累和产量的关键因素<sup>[26]</sup>,Li等<sup>[8]</sup>研究也证明叶绿素含量、SPAD和净光合速率以及总干物质均与穗粒数、千粒重、产量呈显著正相关,Qi等<sup>[27]</sup>研究发现在对籽粒生物量的转移贡献中,叶片的贡献最高,且随着施氮量的增加而增加。因此叶绿素含



R<sub>1</sub> + 15, 吐丝期后 15 d; R<sub>1</sub> + 30, 吐丝期后 30 d.

R<sub>1</sub> + 15, 15 d after silking stage; R<sub>1</sub> + 30, 30 d after silking stage.

图 4 密氮互作下玉米叶绿素含量的变化

Fig. 4 Changes in chlorophyll content of maize under density and nitrogen interaction

量、叶面积指数的升高,将有助于更多的同化物被运输至籽粒<sup>[28]</sup>。此外,氮肥施用量的增加也增加了玉

米根系生物量<sup>[27]</sup>,有助于提高玉米根系对土壤养分和水分的吸收<sup>[29]</sup>,改善玉米的吸收能力,这或许也是

表7 不同种植模式下玉米产量与各指标的相关系数

Table 7 Correlation coefficient between maize yield and various indicators under different planting pattern

种植模式 Planting pattern	有效穗/ (穗/hm <sup>2</sup> ) Effective spike	穗粒数 Grain per spike	千粒重/g Thousand grain weight	干物质积累量/ (kg/hm <sup>2</sup> ) Dry matter accumulation	叶面积指数 Leaf area index	叶绿素含量/ (mg/g) Chlorophyll content
带状套作 A <sub>1</sub>	0.46*	0.13	0.59**	0.84**	0.77**	0.71**
单作 A <sub>2</sub>	0.37	0.08	0.49*	0.86**	0.73**	0.82**

叶绿素含量随施氮量的增加而增加的原因之一。

### 3.2 密度与氮素互作对带状套作玉米产量及相关特性的影响

随种植密度的增加,玉米的抗折力下降、倒伏率上升,而适宜的氮肥能够改善玉米茎秆的生理性状,两者相互作用促进玉米产量的提升<sup>[18]</sup>。任家兵等<sup>[30]</sup>在小麦||蚕豆间作系统中发现,低氮条件下小麦表现为种内竞争,合理增加施氮量后小麦表现为种间竞争,且随着施氮量的增加,种间竞争优势表现出增加趋势,说明施氮量的增加能有效缓解作物种内竞争。Gao等<sup>[20]</sup>研究表明,种植密度过高时,激烈的根系竞争是限制玉米产量的关键因素,而套作玉米相较于单作,有更小的株距,因此竞争更加激烈,需要增加施氮量以满足套作玉米对养分的需求。Duan等<sup>[31]</sup>发现在低密度下适当的增加施氮量能提高氮从叶片向穗的转运,在高密度下则是增加氮向穗的分配而不是向茎的分配。曹胜彪等<sup>[32]</sup>发现在高种植密度条件下,增施氮肥能显著增加玉米的千粒重和穗粒数,进而提高籽粒产量。这与本研究2019年的结果一致,2020年75 000株/hm<sup>2</sup>(B<sub>2</sub>)的带状套作玉米(A<sub>1</sub>)穗粒数变化趋势与2019年不一致,可能是由于2年定位试验的叠加效应所致。带状套作玉米(A<sub>1</sub>)与单作(A<sub>2</sub>)有相同变化规律,带状套作玉米最宜施氮量比单作高75 kg/hm<sup>2</sup>,是因为带状套作玉米的种内竞争较单作强,且密度增加,竞争更强,要缩小产量间的差距,需要维持较高的叶面积指数、叶绿素含量、干物质积累,需要更多的氮肥投入。适宜的施氮量有助于籽粒灌浆期间减少营养器官向籽粒的氮转运<sup>[1]</sup>,可导致叶片衰老推迟,进而延长干物质的积累<sup>[33]</sup>,最终影响产量。

### 3.3 不同种植模式玉米在密度与氮素互作下的产量及相关特性差异

带状复合种植玉米要实现与单作玉米相当的产量水平,密度需与单作密度一致,但所占空间减半,行距缩小<sup>[34]</sup>,株、穴距缩小1倍,种内竞争加剧。但玉米与大豆带状复合种植模式能充分利用大豆的共生固氮作用及玉米和大豆的生态位互补效应,有效提高作物群体对养分、水分和光照等资源的利用效率<sup>[18]</sup>,具有提高土地产出率和减少环境污染等优点<sup>[14]</sup>。已有研究发现,在52 500株/hm<sup>2</sup>水平下要达到较高产量水平,带状复合种植玉米施氮量较单作低60 kg/hm<sup>2</sup><sup>[10,17]</sup>,而本研究结果表明,随着密度的增加,单、套作玉米的产量均得到提升,且带状套作玉米产量的增幅高于单作玉米,但随着密度水平提高,带状套作玉米产量达最高时的施氮量较单作高出75 kg/hm<sup>2</sup>,可能是由于带状套作玉米株距进一步缩小,种内竞争更强,要提升产量、缩小与单作产量间的差距,需要增加氮肥用量缓解竞争。氮素作为蛋白质、核酸、磷脂等的主要组成成分,对植物生长具有促进作用,施氮量的增加也增加了叶片的氮含量<sup>[22]</sup>。另外在适宜的密度与施氮量下,带状套作玉米生育后期的叶面积指数高于单作玉米,有更长的持绿期,这与Feng等<sup>[35]</sup>的研究结果一致,得益于带状复合种植模式下玉米的边际优势<sup>[36]</sup>。因此,在高密度条件下,带状复合种植要实现与单作相当的产量,需要增施氮肥,而且要选配更耐密的玉米品种,还要进一步优化田间配置。

## 4 结论

2种植模式下的玉米密度从中密(60 000株/hm<sup>2</sup>)

增至高密(75 000 株/hm<sup>2</sup>),产量均得到显著提高,且带状套作玉米产量增幅高于单作玉米,但相较于单作玉米,带状套作的最宜施氮量要高出 75 kg/hm<sup>2</sup>。适宜的密氮水平下,带状套作玉米吐丝期的干物质积累增加、叶绿素含量和生育后期的叶面积指数提高,其中叶绿素含量的增幅较单作高。带状套作玉米 60 000 株/hm<sup>2</sup> 配合施氮 300 kg/hm<sup>2</sup> 和 75 000 株/hm<sup>2</sup> 配合施氮 375 kg/hm<sup>2</sup> 下,均可获得较高的产量,分别达 8 914.62 和 9 093.17 kg/hm<sup>2</sup>,可使产量与单作玉米无显著差异。

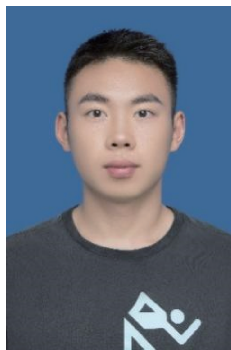
## 参考文献 References

- [1] Lai Z L, Fan J L, Yang R, Xu X Y, Liu L J, Li S E, Zhang F C, Li Z J. Interactive effects of plant density and nitrogen rate on grain yield, economic benefit, water productivity and nitrogen use efficiency of drip-fertigated maize in northwest China [J/OL]. *Agricultural Water Management*, [2022-01-12]. DOI: 10.1016/j.agwat.2021.107453
- [2] Li J, Xie R Z, Wang K R, Ming B, Guo Y Q, Zhang G Q, Li S K. Variations in maize dry matter, harvest index, and grain yield with plant density[J]. *Agronomy Journal*, 2015, 107(3): 829-834
- [3] Li R F, Liu P, Dong S T, Zhang J W, Zhao B. Increased maize plant population induced leaf senescence, suppressed root growth, nitrogen uptake, and grain yield[J]. *Agronomy Journal*, 2019, 111(4): 1581-1591
- [4] Liu G Z, Yang Y S, Guo X X, Liu W M, Xie R Z, Ming B, Xue J, Wang K R, Li S K, Hou P. A global analysis of dry matter accumulation and allocation for maize yield breakthrough from 1.0 to 25.0 Mg ha<sup>-1</sup>[J/OL]. *Resources, Conservation & Recycling*, [2022-09-15]. DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106656
- [5] Hou P, Liu Y, Liu W, Liu G Z, Xie R Z, Wang K R, Ming B, Wang Y H, Zhao R L, Zhang W J, Wang Y J, Bian S F, Ren H, Zhao X Y, Liu P, Chang J Z, Zhang G H, Liu J Y, Yuan L Z, Zhao H Y, Shi L, Zhang L L, Yu L, Gao J L, Yu X F, Shen L G, Yang S Z, Zhang Z D, Xue J Q, Ma X F, Wang X Q, Lu T Q, Dong B C, Li G, Ma B X, Li J Q, Deng X F, Liu Y H, Yang Q, Fu H, Liu X Z, Chen X P, Huang C L, Li S K. How to increase maize production without extra nitrogen input[J/OL]. *Resources, Conservation & Recycling*, [2020-05-17]. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104913
- [6] Luo N, Wang X Y, Hou J M, Wang Y Y, Wang P, Meng Q F. Agronomic optimal plant density for yield improvement in the major maize regions of China[J]. *Crop Science*, 2020, 60(3): 1580-1590
- [7] 明博, 谢瑞芝, 侯鹏, 李璐璐, 王克如, 李少昆. 2005-2016 年中国玉米种植密度变化分析[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(11): 1960-1972
- [8] Ming B, Xie R Z, Hou P, Li L L, Wang K R, Li S K. Changes of maize planting density in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(11): 1960-1972 (in Chinese)
- [9] Li G H, Zhao B, Dong S T, Zhang J W, Liu P, Lu W P. Controlled-release urea combining with optimal irrigation improved grain yield, nitrogen uptake, and growth of maize [J/OL]. *Agricultural Water Management*, [2019-10-11]. DOI: 10.1016/j.agwat.2019.105834
- [10] Gao H X, Zhang C C, van der Werf W, Ning P, Zhang Z, Wan S B, Zhang F S. Intercropping modulates the accumulation and translocation of dry matter and nitrogen in maize and peanut [J/OL]. *Field Crops Research*, [2022-05-20]. DOI: 10.1016/j.fcr.2022.108561
- [11] 周芳. 密度与氮肥对川中丘陵区夏玉米抗倒伏特性、氮素利用及产量的影响[D]. 成都: 四川农业大学, 2020
- [12] Zhou F. Effects of density and nitrogen fertilizer on lodging resistance, nitrogen utilization and yield of summer maize in hilly area of central Sichuan [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2020 (in Chinese)
- [13] Shen Y W, Sui P, Huang J X, Wang D, Whalen J K, Chen Y Q. Global warming potential from maize and maize-soybean as affected by nitrogen fertilizer and cropping practices in the north China Plain[J]. *Field Crops Research*, 2018, 225: 117-127
- [14] 徐钰, 江丽华, 林海涛, 谭德水, 郑福丽, 高新昊, 刘兆辉. 不同氮肥运筹对玉米产量、效益及土壤硝态氮含量的影响[J]. *土壤通报*, 2011, 42(5): 1196-1199
- [15] Xu Y, Jiang L H, Lin H T, Tan D S, Zheng F L, Gao X H, Liu Z H. Effects of different nitrogen regulation on maize yield, economic benefit and the content of soil Nitrate-N[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(5): 1196-1199 (in Chinese)
- [16] Yang F, Wang X C, Liao D P, Lu F Z, Gao R C, Liu W G, Yong T W, Wu X L, Du J B, Liu J A, Yang W Y. Yield response to different planting geometries in maize-soybean relay strip intercropping systems[J]. *Agronomy Journal*, 2015, 107(1): 296-304
- [17] Du J B, Han T F, Gai J Y, Yong T W, Sun X, Wang X C, Yang F, Liu J A, Shu K, Liu W G, Yang W Y. Maize-soybean strip intercropping: Achieved a balance between high productivity and sustainability[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018, 17(4): 747-754
- [18] 陈平, 杜青, 庞婷, 付智丹, 杨燕竹, 刘佳, 帅鹏, 孙丽霞, 张瑞琳, 杨文钰, 雍太文. 根系互作强度对玉米/大豆套作系统下作物根系分布及地上部生长的影响[J]. *四川农业大学学报*, 2018, 36(1): 28-37, 59
- [19] Chen P, Du Q, Pang T, Fu Z D, Yang Y Z, Liu J, Shuai P, Sun L X, Zhang R D, Yang W Y, Yong T W. Effects of root interaction intensity on crop roots distribution above-ground growth in a maize/soybean relay intercropping system[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2018, 36(1): 28-37, 59 (in Chinese)
- [20] Zhou T, Wang L, Yang H, Gao Y, Liu W G, Yang W Y. Ameliorated light conditions increase the P uptake capability of soybean in a relay-strip intercropping system by altering root morphology and physiology in the areas with low solar radiation[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 688: 1069-1080
- [21] 曾瑾汐, 文熙宸, Muhammad Ali Raza, 陈国鹏, 陈诚, 彭霄, 马艳萍, 李丽, 官思成, 杨文钰, 王小春. 氮磷肥施对玉米-大豆套作模式下种间作用、玉米产量及干物质积累与转运的影响[J]. *草业学报*, 2017, 26(7): 166-176
- [22] Zeng J X, Wen X C, Ali Raza M, Chen G P, Chen C, Peng X, Ma Y W, Li L, Guan S C, Yang W Y, Wang X C. Effects of combined applications of nitrogen and phosphorus on interspecies interaction, yield, and dry matter accumulation and translocation in maize in a maize-soybean relay intercropping system [J]. *Acta Pratacauriae Sinica*, 2017, 26(7): 166-176 (in Chinese)
- [23] 李丽. 四川带状套作玉米增密减氮技术研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2019
- [24] Li L. Study on densification and nitrogen reduction technology of relay strip intercropping maize in Sichuan[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2019 (in Chinese)
- [25] 赵雪, 胡晗, 李芳, 林珊, 陈先敏, 吴巩, 李斌彬, 周顺利. 玉米机械粒收品种籽粒灌浆特性及对种植密度和施氮量的响应[J]. *中国农业大学学报*, 2023, 28(5): 12-24
- [26] Zhao X, Hu H, Li F, Lin S, Chen X M, Wu G, Li B B, Zhou S L. Grain filling characteristics of mechanical grain harvest variety maize and its response to plant density and nitrogen fertilizer rate[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(5): 12-24 (in Chinese)
- [27] Gao J, Lei M, Yang L J, Wang P, Tao H B, Huang S B. Reduced row spacing improved yield by optimizing root distribution in maize[J/OL]. *European Journal of Agronomy*, [2021-04-21]. DOI: 10.1016/j.eja.2021.126291
- [28] Liu G Z, Hou P, Xie R Z, Ming B, Wang K R, Liu W M, Yang Y S, Xu W J, Chen J L, Li S K. Nitrogen uptake and response to radiation distribution in the canopy of high-yield maize[J]. *Crop Science*, 2019, 59(3): 1236-1247
- [29] 王银柳, 耿倩倩, 黄建辉, 王常慧, 李磊, 哈斯木其尔, 牛国祥. 氮肥和种植密度对达乌里胡枝子的生长与生物固氮的影响[J]. *植物生态学报*, 2021, 45(1): 13-22
- [30] Wang Y L, Geng Q Q, Huang J H, Wang C H, Li L, Ha S, Niu G X. Effects of nitrogen addition and planting density on the growth and biological nitrogen fixation of *Lespedeza davurica* [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2021, 45(1): 13-22 (in Chinese)



- [23] 朱其岑. 密氮互作对高产夏玉米产量和品质形成的影响及其生理机制[D]. 南京: 南京农业大学, 2019  
Zhu Q C. Effect of dense and nitrogen rates interaction on yield and quality formation of high-yielding summer maize grain and its physiological mechanisms[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019 (in Chinese)
- [24] Li Y Y, Ming B, Fan P P, Liu Y, Wang K R, Hou P, Xue J, Li S K, Xie R Z. Quantifying contributions of leaf area and longevity to leaf area duration under increased planting density and nitrogen input regimens during maize yield improvement[J/OL]. *Field Crops Research*, [2022-04-30]. DOI: 10.1016/j.fcr.2022.108551
- [25] Ali Raza M, Feng L Y, Khalid M H B, Iqbal N, Meraj T A, Hassan M J, Ahmed S, Chen Y K, Yang F, Yang W Y. Optimum leaf excision increases the biomass accumulation and seed yield of maize plants under different planting patterns[J]. *Annals of Applied Biology*, 2019, 175(1): 54-68
- [26] Wang X L, Ye T Y, Ata-Ul-Karim S T, Zhu Y, Liu L L, Cao W, Tang L. Development of a critical nitrogen dilution curve based on leaf area duration in wheat[J/OL]. *Frontiers in Plant Science*, [2017-09-14]. DOI: 10.3389/fpls.2017.01517
- [27] Qi D L, Pan C. Responses of shoot biomass accumulation, distribution, and nitrogen use efficiency of maize to nitrogen application rates under waterlogging[J/OL]. *Agricultural Water Management*, [2021-11-23]. DOI: 10.1016/j.agwat.2021.107352
- [28] Zhao C, Huang H, Qian Z H, Jiang H X, Liu G M, Xu K, Hu Y J, Dai Q G, Huo Z Y. Effect of side deep placement of nitrogen on yield and nitrogen use efficiency of single season late japonica rice[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2021, 20(6): 1487-1502
- [29] Fan J J, McConkey B, Wang H, Janzen H. Root distribution by depth for temperate agricultural crops[J]. *Field Crops Research*, 2016, 189: 68-74
- [30] 任家兵, 张梦瑶, 肖靖秀, 郑毅, 汤利. 小麦||蚕豆间作提高间作产量的优势及其氮肥响应[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28(12): 1890-1900
- Ren J B, Zhang M Y, Xiao J X, Zheng Y, Tang L. Wheat and faba bean intercropping to improve yield and response to nitrogen[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(12): 1890-1900 (in Chinese)
- [31] Duan F Y, Wei Z, Soualiou S, Zhou W Q. Nitrogen partitioning in maize organs and underlined mechanisms from different plant density levels and N application rate in China[J/OL]. *Field Crops Research*, [2023-02-28]. DOI: 10.1016/j.fcr.2023.108874
- [32] 曹胜彪, 张吉旺, 董树亭, 刘鹏, 赵斌, 杨今胜. 施氮量和种植密度对高产夏玉米产量和氮素利用效率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(6): 1343-1353
- Cao S B, Zhang J W, Dong S T, Liu P, Zhao B, Yang J S. Effects of nitrogen rate and planting density on grain yield and nitrogen utilization efficiency of high yield summer maize[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(6): 1343-1353 (in Chinese)
- [33] Marques G E C, Das Chagas Ferreira Aguiar A, Macedo V R A, De Paiva Alves E, Moura E G. Nitrogen use and protein yield of two maize cultivars in cohesive tropical soil[J]. *Journal of Agricultural Science*, 2017, 9(3): 193-201
- [34] Echarte L, Della Maggiora A D, Cerrudo D, Gonzalez V H, Abbate P, Cerrudo A, Sadras V O, Calviño P. Yield response to plant density of maize and sunflower intercropped with soybean [J]. *Field Crops Research*, 2011, 121(3): 423-429
- [35] Feng L Y, Ali Raza M, Shi J Y, Ansar M, Titriku J K, Ahmad Meraj T, Shah G A, Ahmed Z, Saleem A, Liu W G, Wang X C, Yong T W, Yuan S, Feng Y, Yang W Y. Delayed maize leaf senescence increases the land equivalent ratio of maize soybean relay intercropping system [J/OL]. *European Journal of Agronomy*, [2020-03-17]. DOI: 10.1016/j.eja.2020.126092
- [36] Feng L Y, Ali Raza M, Chen Y K, Bin Khalid M H, Ahmad Meraj T, Ahsan F, Fan Y F, Du J B, Wu X L, Song C, Liu C Y, Bawa G, Zhang Z W, Yuan S, Yang F, Yang W Y. Narrow-wide row planting pattern improves the light environment and seed yields of intercrop species in relay intercropping system[J/OL]. *PLoS One*, [2019-02-26]. DOI: 10.1371/journal.pone.0212885

责任编辑: 吕晓梅



第一作者简介: 廖若星, 硕士研究生, 专业方向: 作物栽培学与耕作学。参与国家重点研发计划(2022YFD2300902-02、2022YFD1100203), 玉米新品种关键栽培技术创新与应用项目(2021YFYZ0005)等项目。



通讯作者简介: 王小春, 教授, 博士生导师, 四川省学术与技术带头人, 中国农学会立体农业分会理事、《应用生态学报》编委。长期致力于玉米栽培与耕作学的科研创新、成果转化和教学工作, 研究方向为带状复合种植玉米高产高效栽培技术与理论。编写国家规划教材 2 部, 专著 3 部。主持国家重点研发计划课题及省部级课题 6 项。主持制定了农业部行业标准 1 项和四川省地方标准 1 项。在 *Field Crops Research*、*European Journal of Agronomy*、《中国农业科学》《作物学报》等国内外刊物发表论文 50 余篇, 获国家发明及实用新型专利授权 10 余项。2009 年获四川省科技进步三等奖(排名第四), 2014 年获四川省科技进步二等奖(排名第四), 2017 年获中国作物学会中国作物科技奖(排名第三), 2019 年获四川省科技进步一等奖(排名第三)和农业农村部神农中华农业科技奖科学研究类成果一等奖(排名第五)。