

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2010.01153

密植对不同玉米品种产量性能的影响及其耐密性分析

陈传永¹ 侯玉虹² 孙锐¹ 朱平³ 董志强¹ 赵明^{1,*}

¹ 中国农业科学院作物科学研究所, 北京 100081; ² 沈阳农业大学, 辽宁沈阳 110161; ³ 吉林省农业科学院环境与资源研究中心, 吉林公主岭 136100

摘要: 提高种植密度是玉米高产的重要措施之一, 并且群体密度对冠层光合特性与产量有重要影响, 为阐明不同基因型玉米品种的耐密性, 本研究以先玉 335、郑单 958、吉单 209 为供试品种, 设置 60 000 株 hm^{-2} 、75 000 株 hm^{-2} 、90 000 株 hm^{-2} 、105 000 株 hm^{-2} 4 种密度处理, 测定并计算 6 个生育期的叶面积指数(LAI)、光合势(LAD)、净同化率(NAR)以及产量性能参数平均叶面积指数(MLAI)、平均净同化率(MNAR)、收获指数(HI)、单位面积穗数(EN)、单穗粒数(GN)、千粒重(GW), 并结合产量性能参数的变化对各品种进行耐密性分析。结果表明, 不同品种产量性能参数对密度胁迫的反应相同, MLAI、EN 与密度呈显著正相关, MNAR、HI、GN、GW 与密度呈显著负相关; 各品种产量对密度的响应呈一元二次方程关系, 并具有良好的相关性; 在试验密度范围内, 品种耐密性表现以先玉 335 最好、郑单 958 次之, 吉单 209 较差, 其中, 先玉 335 的适宜密度范围为 90 000~105 000 株 hm^{-2} , 郑单 958 与吉单 209 的适宜密度范围为 75 000~90 000 株 hm^{-2} 。

关键词: 春玉米; 密度; 叶面积指数; 净同化率

Effects of Planting Density on Yield Performance and Density-Tolerance Analysis for Maize Hybrids

CHEN Chuan-Yong¹, HOU Yu-Hong², SUN Rui¹, ZHU Ping³, DONG Zhi-Qiang¹, and ZHAO Ming^{1,*}

¹ Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; ² Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China; ³ Center of Resource and Environmental Science, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Gongzhuling 136100, China

Abstract: Plant density has been recognized as a major factor determining the grain yield. The photosynthetic performance changes as the density increases. The main objective of this research was to evaluate the response of the photosynthetic performance to planting densities in different hybrids of maize (*Zea mays* L.). Field experiments were conducted in Gongzhuling, Jilin province. Three corn hybrids were cultivated at 60 000 plants ha^{-1} , 75 000 plants ha^{-1} , 90 000 plants ha^{-1} , and 105 000 plants ha^{-1} . Treatments were arranged in a split-plot design with three replications. Plant population density was the main-plot and hybrids the subplot. The results indicated that leaf area index (LAI), leaf area duration (LAD), mean leaf area index (MLAI), and ear number m^{-2} (EN) increased and net assimilation rate (NAR), harvest index (HI), grains per ear (GN), and grain weight (GW) decreased in all hybrids as plant density intensified, as a result, the assimilate transmission rate reduced, the leaf senescence accelerated, physiological activity declined. During the growth period, the changes of LAI, LAD showed a single peak curve. The peak of LAI appeared at silking, the peak of chlorophyll content appeared at grain filling and peak of high value duration of LAD appeared from full-grown to milky maturity. The peak of NAR appeared from seeding stage to jointing and from silking to grain filling respectively. The photosynthetic characteristics were different in plant density treatments. The highest grain yield of Xianyu 335, Zhengdan 958, and Jidan 209 was obtained in the treatments of 90 000 plants ha^{-1} , 75 000 plants ha^{-1} , and 90 000 plants ha^{-1} , respectively. Kernel yield per plant decreased in all hybrids as plant density intensified. The density-tolerance of hybrids was Xianyu 335 > Zhengdan 958 > Jidan 209. The suitable planting density range was 90 000–105 000 plants ha^{-1} for Xianyu 335, and 75 000–90 000 plants ha^{-1} for Zhengdan 958 and Jidan 209.

Keywords: Spring maize; Density; Leaf area index (LAI); Net assimilation rate (NAR)

本研究由国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2009CB118605), 国家粮食丰产科技工程项目(2006BAD02A13)和国家自然科学基金项目(30971726)资助。

* 通讯作者(Corresponding author): 赵明, E-mail: zhaomingcau@163.net, Tel: 010-82108752

第一作者联系方式: E-mail: youngsirchen@sohu.com

Received(收稿日期): 2010-01-25; Accepted(接受日期): 2010-04-20.

提高种植密度是获得玉米高产的重要途径,群体密度对光合特性和产量有重要影响,耐密品种的选择一直是栽培与育种学者研究的方向之一。近年来,密植高产典型不断出现,光合性能与产量的密度反应重新成为研究的热点。光合作用是作物产量形成的基础,作物干物质的90%~95%来自光合作用^[1]。玉米产量主要来源于吐丝后叶片的光合同化物,吐丝前同化物对籽粒产量的影响小于10%^[2-4]。前人对不同密度条件下玉米的光合特性及产量构成已经做了大量研究^[5-11],郑广华^[12]从生理因素上指出,经济产量=(光合面积×光合能力×光合时间-消耗)×经济系数,对产量与光合性能参数做了概念性描述,但不能定量地反映不同品种、不同种植密度条件下产量与光合性能参数的关系,张宾等^[13]分析了“三合结构”模式二级结构层各因素之间的关系,建立了产量性能方程“产量(Yield)=穗数(EN)×穗粒数(GN)×千粒重(GW)=(平均叶面积指数)MLAI×(天数)D×平均净同化率(MNAR)×收获指数(HI)”,将作物产量构成因素与光合性能指标有机结合,通过分析产量形成过程中光合性能参数与产量性能参数的变化,为不同品种进行耐密性分析提供了理论基础。

本文利用群体 LAI 动态模拟模型^[14]与净同化率模型^[15]求解 MLAI 与 MNAR,通过 LAI 与 NAR 生育期动态变化与产量性能方程,分析 10 500~13 500 kg hm⁻² 产量水平下,3 个生育期相近的紧凑型玉米品种的光合性能参数与产量性能参数变化规律,以期明确在种植密度增加过程中,限制各品种产量增加的关键因素,为吉林春玉米耐密高产栽培提供理论依据和技术指导。

1 材料与方法

试验于 2006 与 2008 年在吉林省公主岭市吉林省农业科学院试验田(43°29'55"N, 124°48'43"E)进行。试验田耕层土壤(0~20 cm)2006 年 pH 6.1, 含有机质 2.60%、全氮 0.11%、速效氮 102.9 mg kg⁻¹、速效磷 22.55 mg kg⁻¹、速效钾 192.85 mg kg⁻¹; 2008 年 pH 6.0, 含有机质 2.62%、全氮 0.13%、速效氮 125.8 mg kg⁻¹、速效磷 24.46 mg kg⁻¹、速效钾 187.74 mg kg⁻¹。2006 年玉米生育期间(5月1日~9月26日)>0℃积温 3 177℃左右,降水量 436.2 mm 左右,总日照 1 001 h 左右; 2008 年玉米生育期间(5月1日~9月23日)>0℃积温 3 000℃左右,降水量 545.7 mm 左右,总日照 1 220 h 左右。

1.1 材料与设计

两年试验设计相同,供试品种为先玉 335、郑单 958、吉单 209。设 4 个种植密度处理,分别为 60 000 株 hm⁻²、75 000 株 hm⁻²、90 000 株 hm⁻²、105 000 株 hm⁻²。裂区设计,种植密度为主区,品种为副区,3 次重复。试验小区面积为 48 m² (4.8 m×10.0 m), 每小区 8 垄,垄距 0.60 m,长 10 m。底施有机肥 30 m³ hm⁻²、吉新牌玉米专用底肥(15N-10P-15K, 总养分 ≥40%, 吉林吉农高新技术发展股份有限公司) 250 kg hm⁻²; 种肥(吉新牌玉米专用底肥) 250 kg hm⁻²; 吐丝期追肥(尿素) 250 kg hm⁻²。其他管理同当地大田生产。

1.2 叶面积与干物质测定

于玉米拔节期(6月22日)、大喇叭口期(7月3日)、吐丝期(7月23日)、灌浆期(8月14日)、乳熟期(9月3日)、完熟期(9月19日)(其分别为出苗后 35、46、66、88、108、124 d), 从各处理小区选取有代表性的植株 3~5 株(苗期 10 株)进行干物质、叶面积测定。

每小区选取 20 m² 称重计产,并选取 20 穗平均穗进行考种。测定穗长、穗粗、秃尖长度、穗行数、行粒数和千粒重。

1.3 平均叶面积指数(MLAI)与平均净同化率(MNAR)的计算

根据张宾^[14]的方法计算平均叶面积指数(MLAI),根据侯玉虹^[15]的方法计算平均净同化率(MNAR)。

1.4 统计分析

文中所用数据为 2006 年与 2008 年数据平均值,采用 DPS3.01 和 Microsoft Excel 2003 统计分析所有数据。

2 结果与分析

2.1 不同品种玉米产量的耐密性比较

图 1 表明,在 60 000~105 000 株 hm⁻² 范围内,先玉 335、郑单 958、吉单 209 产量与种植密度呈二次方程关系,并且具有良好的相关性。先玉 335 与吉单 209 最高产量出现在 90 000 株 hm⁻², 分别为 13 496.24 kg hm⁻²、11 788.72 kg hm⁻²; 郑单 958 最高产量出现在 75 000 株 hm⁻², 为 12 310.78 kg hm⁻²。在试验的不同种植密度下,先玉 335 比郑单 958 产量分别高 2.86%、0.51%、9.91%、22.44%,比吉单 209 产量分别高 12.75%、7.92%、14.48%、28.16%; 种

植密度增加过程中的产量差异,说明不同品种对种植密度的耐受性不同,先玉335耐密性最好,产量潜力最大,郑单958次之,吉单209耐密性最差。

2.2 光合性能指标变化特征

2.2.1 叶面积指数(LAI)的动态特征 由图2可见,不同品种的 LAI 均随生育进程呈单峰曲线变化,在吐丝期达到最大值,乳熟期后迅速下降;且随种植密度增加而增大。郑单958在90 000株 hm^{-2} 与105 000株 hm^{-2} 种植密度下,各生育期 LAI 变化差异不显著;全生育期平均叶面积指数郑单958>先玉335>吉单209。从出苗到乳熟期,品种间叶面积指数无显著差异;乳熟期后,由于品种特性差异及生育末期叶片衰老程度不同,不同品种 LAI 差异显著,郑单958的叶片衰老速度和程度小于先玉335和吉单209,各生育期都保持较高的 LAI。不同密度群体间叶面积指数,从出苗到乳熟期差异显著,乳熟期

后无显著差异;从4种密度群体的 LAI 变化可以看出,在90 000株 hm^{-2} 与105 000株 hm^{-2} 密度下叶面积指数在整个生育期差异都不显著。

2.2.2 光合势(LAD)动态特征 由表1可见,不同种植密度及不同品种间,吐丝前和吐丝后光合势差异显著。对3个品种在4个种植密度下的 LAD 平均值比较发现,郑单958的花后光合势最大,先玉335、郑单958和吉单209花后光合势分别占总光合势的57.82%、57.70%、57.36%。对4个种植密度中3个品种的平均值比较发现,在密度60 000株 hm^{-2} 、75 000株 hm^{-2} 、90 000株 hm^{-2} 、105 000株 hm^{-2} 时,吐丝后平均光合势分别占总光合势的58.62%、57.46%、57.44%、56.99%,60 000株 hm^{-2} 与105 000株 hm^{-2} 间差异显著,其他种植密度间无显著差异;密度与品种的互作效应呈显著性差异,但各品种间花后光合势占总光合势比例无显著差异。

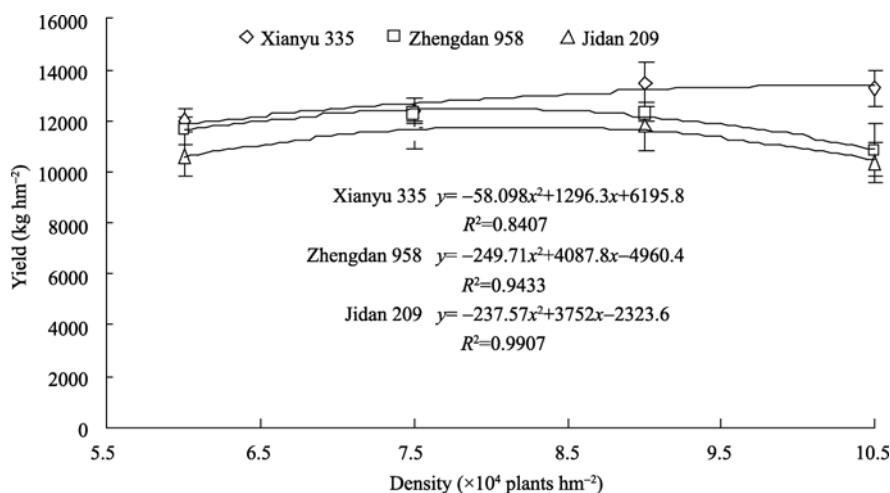


图1 不同品种产量与种植密度的关系

Fig. 1 Yield-density relationship of different hybrids under different plant densities

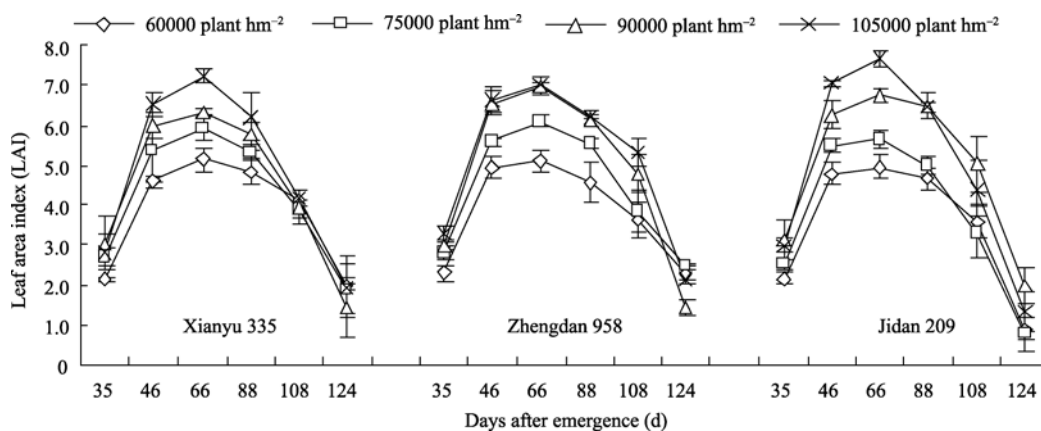


图2 不同密度条件下玉米叶面积指数(LAI)变化

Fig. 2 Effect of plant density on leaf area index (LAI) of maize

表 1 不同密度条件下玉米群体光合势(LAD)变化
Table 1 Effect of plant density on population leaf area duration (LAD) of maize (m² d m⁻²)

密度 Density (×10 ⁴ plants hm ⁻²)	品种 Hybrid	光合势 LAD			吐丝后光合势/ 总光合势 LAD post silking/ total LAD (%)
		吐丝前 LAD Before silking LAD	吐丝后 LAD Post silking LAD	总光合势 Total LAD	
—	先玉 335 Xianyu 335	199.27 B	271.97 B	471.24 B	57.82
—	郑单 958 Zhengdan 958	209.83 A	286.22 A	496.06 A	57.70
—	吉单 209 Jidan 209	201.85 AB	271.92 B	473.77 B	57.36
6.0	—	166.31 D	236.08 C	402.39 D	58.62 a
7.5	—	193.80 C	262.17 B	455.96 C	57.46 ab
9.0	—	219.56 B	296.99 A	516.55 B	57.44 ab
10.5	—	234.92 A	311.59 A	546.52 A	56.99 b
	Hybrid (H)	**	**	**	ns
	Density (D)	**	**	**	ns
	H×D	ns	**	**	*
	CV (%)	13.70	12.70	12.70	3.05

同一列中数据后字母相同表示在 0.05(小写字母)与 0.01(大写字母)水平下无显著差异。*: 在 0.05 水平差异显著; **: 在 0.01 水平差异显著; ns: 在 0.05 水平差异不显著; “—”: 无效数据。

Means with the same letter are not significantly different at $P\leq0.05$ (the small letter) and $P\leq0.01$ (the capital letter) level in the same column. *: significant at the 0.05 probability level. **: significant at the 0.01 probability level. ns: nonsignificant at the 0.05 level. “—”: data not available.

2.2.3 净同化率(NAR)的动态特征 图3显示, 苗期到成熟期, 净同化率呈下降—升高—下降的趋势, 高峰期出现在苗期至拔节期与灌浆至乳熟期。各品种的平均净同化率吐丝前差异不显著, 吐丝后差异显著; 不同种植密度间比较, 净同化率随着种植密度增加呈下降趋势, 其中, 在苗期和吐丝期, 60 000 株 hm⁻²和 75 000 株 hm⁻²密度下的净同化率显著高于 90 000 株 hm⁻²和 105 000 株 hm⁻²密度下的净同化率。净同化率之间的密度差异, 说明随着种植密度增加, 群体拥挤, 植株中下部叶片光合速率降低, 影响净同化率, 密度越高, 净同化率越小。

2.3 不同群体玉米光合性能参数变化

MLAI、MNAR、HI 是光合性能方程的重要参数, MLAI、MNAR 决定植株的生物产量, 可以衡量群体与个体性能的优劣^[14], HI 则反映生物产量的转化效率, 对经济产量的形成有决定作用。图 4 表明, 在试验设计范围内, MLAI 随种植密度增加而升高, MNAR 与 HI 随种植密度升高而降低。由于品种特性不同, 不同品种在种植密度增加过程中, MLAI、MNAR、HI 对种植密度的反应不同, 符合 $y=ax^2+bx+c$ 关系, 对图 4-A 中种植密度-MLAI 曲线进行模拟, 各品种拟合方程分别为先玉 335, $y=-0.0239x^2+0.6345x+$

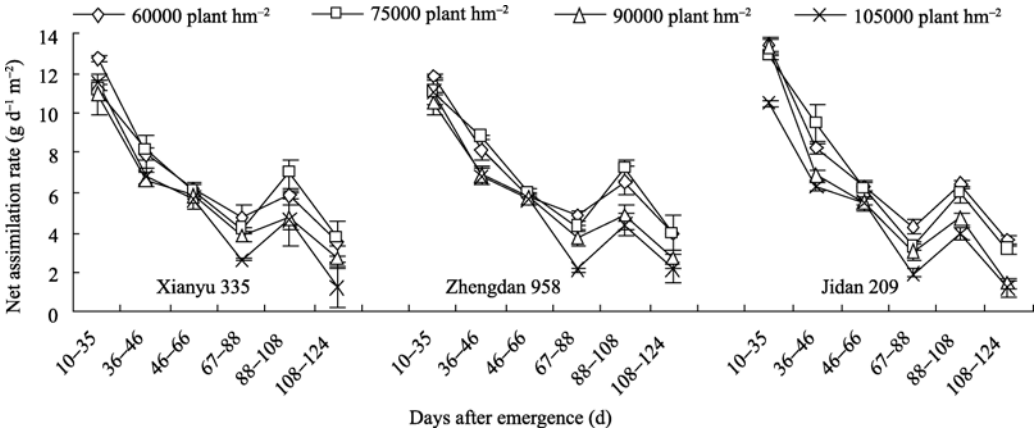


图 3 不同密度条件下玉米净同化率变化
Fig. 3 Effect of plant density on net assimilation rate (NAR) of maize

0.2582 ($R^2=0.9984^{**}$), 郑单 958, $y=-0.0331x^2+0.8133x-0.4518$ ($R^2=0.9853^*$), 吉单 209, $y=0.0122x^2+0.5213x+0.4949$ ($R^2=0.9842^*$); 对图 4-B 中种植密度-MNAR 曲线进行模拟, 各品种拟合方程分别为先玉 335, $y=0.0356x^2-0.8161x+10.638$ ($R^2=0.9949^{**}$), 郑单 958, $y=0.0199x^2-0.6508x+10.202$ ($R^2=0.9569^*$), 吉单 209, $y=-0.0415x^2+0.3492x+6.3404$ ($R^2=0.9986^{**}$); 对图 4-C 中种植密度-HI 曲线进行模拟, 各品种拟合方程分别为先玉 335, $y=-0.0001x^2-0.0025x+0.4615$ ($R^2=0.9440^*$); 郑单 958, $y=-0.0025x^2+0.0327x+0.3273$ ($R^2=0.9975^{**}$); 吉单 209, $y=-0.0008x^2-0.0004x+0.4701$ ($R^2=0.9789^*$), 分析方程中各参数发现, 随着种植密度增加, MLAI、MNAR、HI 变幅为吉单 209>郑单 958>先玉 335。

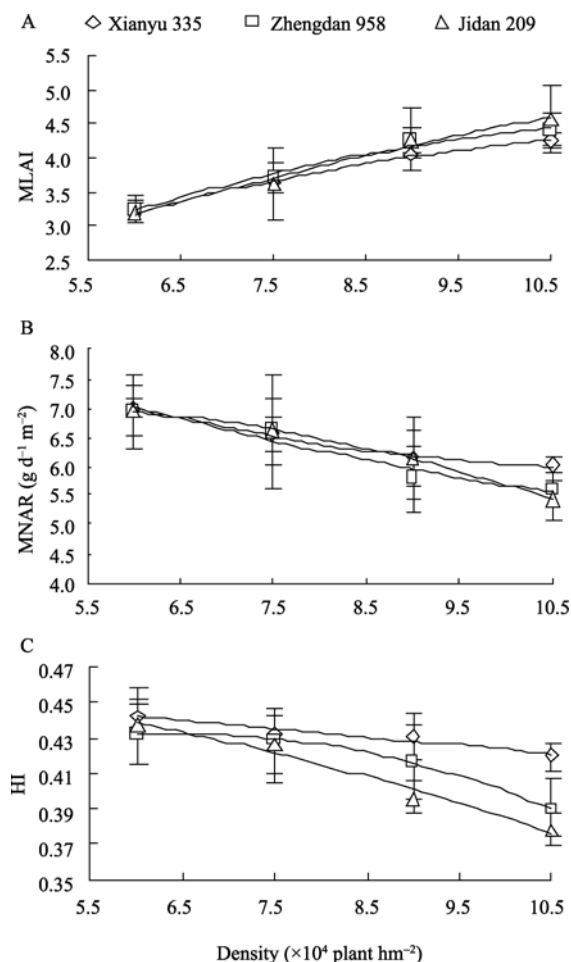


图 4 不同密度条件下春玉米平均叶面积指数(A)、平均净同化率(B)和收获指数(C)的变化

Fig. 4 Effect of plant density on mean leaf index (MLAI), mean net assimilation rate (MNAR), and harvest index (HI) of different spring maize hybrids

2.4 不同密度下春玉米产量性能方程参数的变化特点

协调在种植密度增加过程中群体与个体的矛盾, 实现源库平衡是密植高产的关键, 表2 表明, 种植密度增加过程中, 产量性能参数 MLAI 上升, MNAR、HI 下降; 产量构成参数 EN 上升, GN、GW 下降。先玉 335、郑单 958、吉单 209 种植密度由 60 000 增加到 105 000 株 hm^{-2} , MLAI 分别增加 33.18%、35.30%、42.89%, MNAR 分别降低 16.79%、24.05%、28.22%, HI 分别降低 5.35%、10.85%、15.51%, GN 分别降低 25.59%、37.12%、38.35%, GW 分别降低 12.59%、14.75%、19.88%, MLAI 与 GN、GW 的不同变化体现了群体与个体的矛盾, HI 与 MNAR 的变化体现了“源库”的协调能力。不同品种之间由于群体与个体矛盾差异不同, 源库协调能力不同, 种植密度由 60 000 增加至 105 000 株 hm^{-2} , 各品种产量均先增加后降低, 先玉 335、吉单 209 在 90 000 株 hm^{-2} 时产量最高, 郑单 958 产量在 75 000 株 hm^{-2} 时产量最高。这说明, 由于品种差异, 其适宜的种植密度不同, 只有选择最适宜的种植密度才能充分发挥品种的高产潜力。

2.5 产量性能方程参数的相关性

为阐明各品种在种植密度增加过程中产量性能方程各参数之间相互关系及存在的差异, 分品种对各参数进行了相关分析。表 3 表明, 不同品种间, 产量与产量性能参数的相关性不同, 其中, 先玉 335 产量(Yield)与 MLAI、EN 呈显著正相关, 与 MNAR、HI、GW、GN 呈显著负相关; 郑单 958 产量(Yield)与 HI、GN、GW 呈显著正相关; 吉单 209 产量(Yield)与各参数无显著相关; 结合表 2 分析, 说明在种植密度增加过程中, MLAI、MNAR、HI 相互制约、平衡, MLAI 与 MNAR 保持了物质生产的稳定性, 但是由于转移效率即 HI 降低程度不同, 当群体升高一定的“阈”值时, 由于 HI 降低, EN 增加对产量的正效应小于 GN、GW 降低对产量的负效应, 导致产量下降。

3 讨论

3.1 种植密度对产量与光合性能的影响

种植密度增加过程中, 单株生产效应下降, 当单株生产效应对总产量的影响超过群体生产效应时, 则表现群体总产量下降^[16]。产量和种植密度表现出二次方程关系, 玉米产量随着种植密度增加而提高, 当到达最高产量后降低, 在高度密植条件下, 总干物质产量对籽粒的分配逐渐减少^[17]。本研究表明,

表 2 不同密度下春玉米产量性能方程参数
Table 2 Parameters of yield capability equation of spring maize with different plant densities

品种 Cultivar	密度 Plant density ($\times 10^4$ plants hm^{-2})	光合性能参数 Photosynthetic parameter				产量构成参数 Yield component			产量 Yield (kg hm^{-2})
		MLAI	GD (d)	MNAR ($\text{m}^2 \text{ d m}^{-2}$)	HI	EN (ears)	GN (grains)	GW (g)	
先玉 335	6.0	3.19 d	124	6.94 a	0.45 a	6.02 d	516.53 a	385.99 a	11995.37 b
Xianyu 335	7.5	3.63 c	124	6.42 b	0.44 b	7.08 c	480.06 b	372.66 b	12373.99 b
	9.0	4.06 b	124	6.06 c	0.43 bc	8.64 b	439.78 c	358.54 c	13496.24 a
	10.5	4.29 a	124	5.94 c	0.42 c	9.69 a	411.27 d	342.84 c	13288.77 a
郑单 958	6.0	3.33 c	122	6.81 a	0.44 a	6.11 d	507.41 a	362.84 a	11661.78 ab
Zhengdan 958	7.5	3.82 b	122	6.44 b	0.43 a	7.26 c	482.60 a	354.01 ab	12310.78 a
	9.0	4.35 a	122	5.54 c	0.43 a	8.93 b	424.39 b	331.11 bc	12279.34 a
	10.5	4.52 a	122	5.38 c	0.40 b	9.89 a	370.04 c	316.21 c	10853.39 b
吉单 209	6.0	3.27 c	122	6.65 a	0.43 a	5.94 d	540.12 a	355.23 a	10638.62 bc
Jidan 209	7.5	3.90 b	122	6.11 a	0.42 ab	7.32 c	493.84 b	333.45 ab	11466.03 ab
	9.0	4.52 a	122	5.80 ab	0.39 bc	8.69 b	448.09 c	312.97 bc	11788.72 a
	10.5	4.83 a	122	5.25 b	0.38 c	9.78 a	390.41 d	296.33 c	10368.71 c

数值后不同字母表示密度处理间达 0.05 差异水平。MLAI: 平均叶面积指数; GD: 生育天数; MNAR: 平均净同化率; HI: 收获指数; EN: 单位面积穗数; GN: 穗粒数; GW: 千粒重。

Values followed by different letters are significantly ($P < 0.05$) different among density treatments. MLAI: mean leaf area index; GD: growth days; MNAR: mean net assimilation rate; HI: harvest index; EN: ear No. per m^2 ; GN: grain number per ear; GW: 1000-kernel weight.

表 3 不同品玉米种产量与产量性能方程参数的相关性分析
Table 3 Correlation coefficient between yield and the parameters of yield capability equation for different spring maize hybrids

项目 Item	先玉 335 Xianyu 335	郑单 958 Zhengdan 958	吉单 209 Jidan 209
平均叶面积指数 MLAI	0.9372**	-0.2946	0.0492
平均净同化率 MNAR	-0.9362**	0.3422	0.1193
收获指数 HI	-0.7634*	0.7809*	0.1540
单位面积穗数 EN	0.9252**	-0.4202	-0.0399
穗粒数 GN	-0.9239**	0.5686*	0.1492
千粒重 GW	-0.8865**	0.5120*	0.0342

*: 在 0.05 水平差异显著; **: 在 0.01 水平差异显著。

*: significant at the 0.05 probability level; **: significant at the 0.01 probability level. MLAI: mean leaf area index; MNAR: mean net assimilation rate; HI: harvest index; EN: ear No. per m^2 ; GN: grain number per ear; GW: 1000-kernel weight.

在试验密度范围内, 产量与种植密度的关系符合拟合方程 $y=ax^2+bx+c$ 。关于种植密度对产量构成因素的影响, 本研究认为种植密度通过影响穗粒数、粒重影响产量, 这与前人研究结果一致^[18-19]。但也有研究认为千粒重是决定产量的主要因素, 穗数和穗粒数受密度影响较小^[20]。

提高种植密度, 增加光合势在后期的分配比例和花后净同化率, 是玉米高产的重要途径。叶片是冠层的主要组成部分, 是光合作用的主要器官, 叶

面积大小、功能期长短、光合效率、光合产物的积累与分配决定作物的群体产量^[21], 随着种植密度增加, 玉米单株的叶面积、光合势呈现出下降趋势; 而群体的叶面积、叶面积系数、光合势呈现增长趋势, 且高低种植密度间的相差较大, 冠层通过对光合有效辐射的截获和吸收而影响作物光合特性, 并直接影响生育期净同化率与物质分配比例。吐丝期到乳熟期群体叶片光合特性, 特别是中上部叶片光合作用持续期直接决定籽粒产量^[22-23]。前人研究发现, 高产群体吐丝后光合势占总光合势的 50%以上^[24-25], 最高达到 79.6%^[26], 本研究中吐丝后光合势占总光合势的 57%左右, 造成吐丝后光合势占总光合势比例差异的原因主要是品种特性、外界环境、种植模式与管理方式不同的影响。

不同品种对种植密度的反应不同, 低密条件下, 单株叶面积可调性差^[27-28], 在高密条件下, 叶片光合速率下降, 光合产物降低, 叶片衰老加快, 影响光合速率与净同化率, 单株资源利用率降低导致单株产量下降的负效应不能被株数增加的正效应弥补^[29-30], 因此, 必须协调群体与个体矛盾, 优化种植密度, 最佳种植密度有品种差异^[31]。本研究中不同品种对密度的反应不同, 综合产量、光合性能参数、产量性能方程参数对密度的反应规律, 分析品种耐密性发现, 先玉 335 最好、郑单 958 次之, 吉单

209 较差, 其中先玉 335 的适宜密度范围为 90 000~105 000 株 hm^{-2} , 郑单 958 与吉单 209 的适宜密度范围为 75 000~90 000 株 hm^{-2} 。

3.2 产量性能方程与耐密性

密植条件下实现源库平衡是作物高产的关键, 增加种植密度可增加干物质积累, 但是物质转化效率降低^[32], 因此, 种植密度增加过程中, 植株干物质增量高于籽粒产量增量。依靠增加群体数量的结构性增产与依靠改善个体生理功能的功能性增产是提高玉米产量的两条途径^[33], 产量方程参数的变化对玉米耐密栽培与产量提高有重要的参考价值, 本研究表明, 在种植密度增加过程中, 干物质增加是 MLAI、MNAR 共同作用的结果, 但由于物质转化效率降低, HI 降低, 引起产量构成因素中 GN、GW 下降, 致使籽粒库容降低, 导致产量增加缓慢或负增长。由于品种特性不同, 不同品种光合性能参数与产量性能参数变化不同, 应针对不同品种采取不同的增产途径, 先玉 335 适合增加群体数量以促进 MLAI 的结构性增产途径, 郑单 958 与吉单 209 适合在保证适宜高密度条件下, 改善个体生理功能, 增加干物质分配效率, 提高 HI, 结构性与功能性增产途径并重。

4 结论

利用产量性能方程, 明确不同品种在种植密度增加过程中光合性能参数与产量构成参数之间的关系, 对指导不同生态区玉米耐密栽培有重要意义。耐密性以先玉 335>郑单 958>吉单 209; 在光热资源相对丰富的吉林省中西部地区, 对这3个品种通过调整种植密度很容易实现 10 500 kg hm^{-2} 的产量目标; 但要实现 12 000~13 500 kg hm^{-2} 的高产目标, 应选用先玉 335 与郑单 958, 种植密度范围应分别保持在 90 000~105 000 株 hm^{-2} 与 75 000~90 000 株 hm^{-2} ; 若要充分发挥品种潜力, 实现 13 500 kg hm^{-2} 以上的超高产目标, 需要在适宜密度范围的基础上, 针对品种特点, 明确主攻目标, 并制定相应的管理措施。

References

- [1] Shen Y-G(沈允钢), Shi J-N(施教耐), Xu D-Q(许大全). Kinetic Photosynthesis (动态光合作用). Beijing: Science Press, 1998, 1-3 (in Chinese)
- [2] Simmons S R, Jones R J. Contributions of pre-silking assimilate to grain yield in maize. *Crop Sci*, 1985, 25: 1004-1006
- [3] Hashemi A M, Herbert S J, Putnam D H. Yield response of corn to crowding stress. *Agron J*, 2005, 97: 839-846
- [4] Wang Q-C(王庆成), Wang Z-X(王忠孝), Zhang X-Q(张秀清), Wang C-Y(王春英), Zhang H-L(张海林). Character and dynamic changes of population structure for new compact maize hybrids. *J Shandong Agric Sci* (山东农业科学), 1998, (5): 4-9 (in Chinese with English abstract)
- [5] Dong S-T(董树亭), Hu C-H(胡昌浩), Gao R-Q(高荣岐), Wang Q-Y(王群瑛). Relationship between canopied respiratory rate and photosynthetic characteristics of high-yielding summer maize. *J Maize Sci* (玉米科学), 1994, 2(3): 61-65 (in Chinese)
- [6] Dong S-T(董树亭), Gao R-Q(高荣岐), Hu C-H(胡昌浩), Wang Q-Y(王群瑛), Wang K-J(王空军). Study of canopy photosynthesis property and high yield potential after anthesis in maize. *Acta Agron Sin* (作物学报), 1997, 23(3): 318-325 (in Chinese with English abstract)
- [7] Borrás L, Maddonni G A, Otegui M E. Leaf senescence in maize hybrids: plant population, row spacing and kernel set effects. *Field Crops Res*, 2003, 82: 13-26
- [8] Shen X-Y(沈秀瑛), Dai J-Y(戴俊英), Hu A-C(胡安畅), Xu S-C(徐世昌). Studies on the relationship among leaf photosynthetic rate, light, nutrient, water and yield of maize. *J Maize Sci* (玉米科学), 1994, 2(3): 56-60 (in Chinese)
- [9] Wang Q-Y(王群瑛), Hu C-H(胡昌浩). Studies on the relationship between chlorophyll uhastructure and photosynthetic characters of leaf blades on different nodes in maize. *Acta Bot Sin* (植物学报), 1988, 30(2): 146-150 (in Chinese with English abstract)
- [10] Zuo B-Y(左宝玉), Li S-Y(李世仪), Kuang T-Y(匡廷云), Duan X-C(段续川). The changes of ultrastructure and chlorophyll content of chloroplast of leaves in different ranks in maize. *Acta Agron Sin* (作物学报), 1987, 13(3): 213-217 (in Chinese with English abstract)
- [11] Lü L-H(吕丽华), Tao H-B(陶洪斌), Xia L-K(夏来坤), Zhang Y-J(张雅杰), Zhao M(赵明), Zhao J-R(赵久然), Wang P(王璞). Canopy structure and photosynthesis traits of summer maize under different planting densities. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2008, 34(3): 447-455 (in Chinese with English abstract)
- [12] Zheng G-H(郑广华). Cultural Physiology of Crops (作物栽培生理). Jinan: Shandong Science and Technology Press, 1980 (in Chinese)
- [13] Zhang B(张宾), Zhao M(赵明), Dong Z-Q(董志强), Chen C-Y(陈传永), Sun R(孙锐). "Three Combination Structure" quantitative expression and high yield analysis in crops. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2007, 33(10): 1674-1681 (in Chinese with English abstract)
- [14] Zhang B(张宾), Zhao M(赵明), Dong Z-Q(董志强), Li J-G(李建国), Chen C-Y(陈传永), Sun R(孙锐). Establishment and test of LAI dynamic simulation model for high yield population. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2007, 33(4): 612-619 (in Chinese with English abstract)
- [15] Hou Y-H(侯玉虹). Simulation Research on Maize Yield Property Based on Field Climatic Real Time Monitor. PhD Dissertation of Shenyang Agricultural University, 2009 (in Chinese with English abstract)

- abstract)
- [16] Tong P-Y(佟屏亚), Cheng Y-N(程延年). Study on the relationship between maize planting density and yield. *J Beijing Agric Sci* (北京农业科学), 1995, 13(1): 23–25 (in Chinese with English abstract)
- [17] Xue Z-Z(薛珠政), Lu H-D(卢和顶), Lin J-X(林建新). Effect of the density of the corn to single plant and population. *J Maize Sci* (玉米科学), 1999, 7(2): 52–54 (in Chinese with English abstract)
- [18] Yang G-H(杨国虎), Li X(李新), Wang C-L(王承莲), Luo X-N(罗湘宁). Study on effects of plant densities on the yield and the related characters of maize hybrids. *Acta Agric Boreali-Occident Sin* (西北农业学报), 2006, 15(5): 57–60 (in Chinese with English abstract)
- [19] Liu W-R(刘武仁), Zheng J-Y(郑金玉), Feng Y-C(冯艳春). The quality effect of different densities of elite maize variety. *J Maize Sci* (玉米科学), 2005, 13(2): 99–101 (in Chinese with English abstract)
- [20] Cui Y-H(崔彦宏). Study on yield and yield components in different populations of spring corn. *J Hebei Agric Univ* (河北农业大学学报), 1992, 15(1): 14–18 (in Chinese with English abstract)
- [21] Shen X-Y(沈秀瑛), Dai J-Y(戴俊英), Hu A-C(胡安畅), Gu W-L(顾慰连), Zheng B(郑波). Studies on relationship among character of canopy light interception and yield in maize populations (*Zea mays* L.). *Acta Agron Sin* (作物学报), 1993, 19(3): 246–252 (in Chinese with English abstract)
- [22] Hu C-H(胡昌浩), Dong S-T(董树亭), Yue S-S(岳寿松). Studies on relationship between leaf photosynthetic rate and crop yield in summer maize with high yield. *Acta Agron Sin* (作物学报), 1993, 19(1): 63–69 (in Chinese with English abstract)
- [23] Hu C-H(胡昌浩), Pan Z-L(潘子龙). Studies on the rules of assimilate accumulation and nutrient absorption and distribution in the summer maize plant: I. Rules of the dry-matter accumulation and the variation of water-soluble carbohydrates and free amino-acid contents. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 1982, 15(1): 56–64 (in Chinese with English abstract)
- [24] Hu C-H(胡昌浩), Dong S-T(董树亭), Wang K-J(王空军), Sun Q-Q(孙庆泉). The study on evolution during all growth stage of maize in different eras in China: II. The evolution on material production. *J Maize Sci* (玉米科学), 1998, (3): 49–53 (in Chinese)
- [25] Chen C-Y(陈传永), Dong Z-Q(董志强), Zhao M(赵明), Zhang B(张宾), Zhu P(朱平). Researches of analysis and growth on spring maize with super-high yield in cold region. *J Maize Sci* (玉米科学), 2007, 15(3): 75–79 (in Chinese with English abstract)
- [26] Zhou Y-D(周跃东), Yi N-Y(易念游), Wu H(吴昊). Study on growth rule and physiological characteristics of leaf in the higher yield corn populations. *J Sichuan Agric Univ* (四川农业大学学报), 1994, 12(2): 212–217 (in Chinese with English abstract)
- [27] Tetio-Kagho F, Gardner F P. Responses of maize to plant population density: II. Reproductive development, yield, and yield adjustments. *Agron J*, 1988, 80: 935–940
- [28] Cox W J. Whole-plant physiological and yield responses of maize to plant density. *Agron J*, 1996, 88: 489–496
- [29] Andrade F H, Vega C, Uhart S, Cirilo A, Cantarero M, Valentinuz O. Kernel number determination in maize. *Crop Sci*, 1999, 39: 453–459
- [30] Vega C R C, Andrade F H, Sadras V O, Uhart S A, Valentinuz O R. Seed number as a function of growth. A comparative study in soybean, sunflower and maize. *Crop Sci*, 2001, 41: 748–754
- [31] Widdicombe W D, Thelen K D. Row width and plant density effects on corn grain production in the northern corn belt. *Agron J*, 2002, 94: 1020–1023
- [32] Tollenaar M. Genetic improvement in grain yield of commercial maize hybrids grown in Ontario from 1959 to 1988. *Crop Sci*, 1989, 29: 1365–1371
- [33] Zhao M(赵明), Li J-G(李建国), Zhang B(张宾), Dong Z-Q(董志强), Wang M-Y(王美云). The compensatory mechanism in exploring crop production potential. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2006, 32(10): 1566–1573 (in Chinese with English abstract)