

种植密度和施氮量对不同株高夏玉米产量和氮素利用的影响

任佰朝, 范霞, 董树亭, 刘鹏, 赵斌, 张吉旺*

(作物生物学国家重点实验室/山东农业大学农学院, 山东泰安 271018)

摘要:【目的】本研究旨在探讨不同株高夏玉米产量和氮素利用对种植密度和施氮量的响应。【方法】以矮秆玉米品种登海 661 (DH661)、中秆品种郑单 958 (ZD958) 和高秆品种鲁单 981 (LD981) 为试验材料, 在大田条件下设置 2 个种植密度 (67500 和 82500 plant/hm²) 和 3 个施氮量 (N 0、180 和 270 kg/hm²), 以不施氮为对照, 研究种植密度和施氮量对不同株高夏玉米氮素吸收与利用特性的影响。【结果】在密度为 82500 plant/hm² 条件下, 品种 DH661、ZD958 和 LD981 的籽粒产量分别较 67500 plant/hm² 分别提高 5.0%、10.2% 和 12.5%; 施氮 180 和 270 kg/hm² 处理 DH661、ZD958 和 LD981 的籽粒产量差异不显著。高密度条件下 (82500 plant/hm²), 施氮 270 kg/hm² 时 DH661 氮素转运效率和转运氮贡献率较 180 kg/hm² 显著降低, ZD958 和 LD981 变化不显著; 低密度条件下 (67500 plant/hm²), 施氮 270 kg/hm² 时 DH661 和 ZD958 氮素转运效率和氮素转运贡献率较 180 kg/hm² 显著提高, LD981 的则显著降低。DH661 的氮素利用效率较 ZD958 和 LD981 分别提高 7.4% 和 39.1%, LD981 的氮素吸收效率较 ZD958 和 DH661 品种分别提高 18.9% 和 25.0%。【结论】在低密度 67500 plant/hm² 条件下, 增施氮肥, 矮秆和中秆品种的氮素转运效率和氮素转运贡献率显著降低, 而高秆品种的则提高。高密度 82500 plant/hm² 条件下, 增施氮肥, 矮秆品种氮素转运效率和氮素转运贡献率显著降低, 中秆和高秆品种的无显著变化。

关键词: 不同株高夏玉米; 种植密度; 施氮量; 氮素效率

Effect of plant density and nitrogen rate on yield, nitrogen uptake and use efficiency of summer maize hybrids with different plant height

REN Bai-zhao, FAN Xia, DONG Shu-ting, LIU Peng, ZHAO Bin, ZHANG Ji-wang*

(State Key Laboratory of Crop Biology/Agronomy College of Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China)

Abstract: 【Objectives】 This study is to investigate grain yield, nitrogen uptake and use efficiency of summer maize with different plant height in response to plant density and nitrogen rate. 【Methods】 Three hybrids: high-stalk (Ludan981, LD981), medium-stalk (Zhengdan958, ZD958) and short-stalk (Denghai661, DH661) were used as experimental materials in a field experiment. Two plant densities of 67500 and 82500 plants/hm², and three nitrogen rate of 0, 180 and 270 kg/hm² were designed for each hybrid. The yield, N contents and accumulation were investigated; the N translocation rate and their contribution to yield were calculated. 【Results】 The grain yields of three hybrids DH661, ZD958 and LD981 in density of 82500 plants/hm² were 5.0%, 10.2% and 12.5% higher than those in density of 67500 plants/hm², but the differences between N treatment of 180 and 270 kg/hm² were not significant under the two densities. When the density was 82500 plants/hm², the nitrogen translocation efficiency (NTE) and nitrogen contribution proportion (NCP) of DH661 in N 270 kg/hm² were significantly lower than those in N 180 kg/hm², those of hybrids of ZD958 and LD981 were not varied obviously. When the density was 67500 plants/hm², the NTE and NCP of DH661 and ZD958 in N 270 kg/hm² were higher than those in N 180

收稿日期: 2016-03-30 接受日期: 2016-08-30

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31271662); 国家现代农业产业技术体系建设项目 (CARS-02-20); 山东省农业重大应用技术创新项目; 国家重点基础研究发展计划 (973 项目) 课题 (2015CB150404) 资助。

作者简介: 任佰朝 (1987—), 男, 山东日照人, 博士研究生, 主要从事玉米栽培生理生态方面的研究。E-mail: renbaizhao@sina.com

* 通信作者 Tel: 0538-8241485; E-mail: jwzhang@sdau.edu.cn

kg/hm², but those of LD981 were opposite. Nitrogen use efficiency (NUE) of DH661 was 7.4% and 39.1% higher than those of ZD958 and LD981 respectively, and nitrogen uptake efficiency (NUPE) of LD981 was 18.9% and 25.0% higher than those of ZD958 and DH661, respectively. 【Conclusions】 Under density of 67500 plant/hm², high nitrogen fertilizer input will decrease the nitrogen translocation efficiency and nitrogen contribution of medium and short stalk hybrids but increase those of high stalk hybrid. Under high density of 82500 plant/hm², high N fertilizer rate will significantly decrease the two items of short hybrid, but not decrease those of medium and high stalk hybrids.

Key words: summer maize with different plant height; plant density; nitrogen rate; nitrogen use efficiency

增加种植密度是玉米高产的关键措施之一^[1-2]。种植密度增加也会增加植株群体的需氮量^[3-5], 合理施用氮对提高夏玉米产量和氮肥利用率具有重要意义。研究表明, 株高与产量呈显著或极显著正相关关系^[6-7], 理想的玉米株高一般认为 240~280 cm^[8]。提高种植密度会加剧玉米单株对光温肥水等资源的争夺, 过高的密度会导致玉米植株茎秆细弱, 根系伸展受到抑制, 容易倒伏, 倒伏率每增加1%, 大约减产 108 kg/hm²^[9]。施氮量对玉米营养器官氮素的运转和籽粒贡献报道较多, 但结论不一致。丁民伟等^[4]认为, 氮素转运对籽粒氮的贡献率在不施氮时较高。有的研究发现, 增加施氮量提高玉米营养器官氮素转运量及其对籽粒氮的贡献率^[10]; 有的研究发现, 增加施氮虽提高玉米营养体氮素转运量和转运效率但对籽粒氮的贡献率则保持在 50.8%~62.9%^[11]。何萍等^[12]认为, 随氮肥用量的增加玉米营养器官的氮素运转率呈先增加后降低趋势, 过量氮素运转则导致叶片早衰及光合能力下降, 最终可能影响到正在发育籽粒的碳、氮输送, 不利于产量和氮肥利用率的提高^[13]; 随施氮量增加, 夏玉米氮肥利用和氮素利用效率呈先增加后降低趋势^[14-17]; 夏玉米氮肥偏生产力随着种植密度增加呈先增加后降低趋势; 高密度条件下, 随施氮量增加, 夏玉米氮素转运效率及贡献率呈上升趋势, 而氮肥偏生产力、氮肥利用率和氮素农学利用效率呈下降趋势^[18]。前人对不同株高类型夏玉米同化物积累转运与分配特性进行了报道, 随着株高的增加, 夏玉米花后干物质积累量显著降低, 上部叶片光合产物转移率相对提高, 中、下部叶片转移率有所下降^[19]。但没有比较不同株高类型夏玉米氮素吸收与利用特性, 也缺乏氮密互作对不同株高类型夏玉米氮素吸收与利用特性的影响研究。本试验选用不同株高类型夏玉米品种为试验材料, 分别为高秆玉米品种鲁单 981 (LD981)、中秆品种郑单 958 (ZD958)、矮秆品种登海 661 (DH661)。LD981 于 2009 年获国家科技进步二等奖; 郑单 958 于 2007

年获国家科技进步一等奖, 且为全国种植面积最大的品种; 登海 661 于 2005 年实现亩产 1402.86 公斤, 打破世界夏玉米高产记录, 且为近几年山东省玉米高产创建主要品种。在前期研究^[19]的基础上, 选择 2 个种植密度, 分别为 67500 (低密度) 和 82500 株/hm² (高密度); 3 个施氮量, 分别为 0、180 和 270 kg/hm², 连续 2 年研究了种植密度和施氮量对不同株高类型夏玉米籽粒产量、氮肥偏生产力、氮素吸收效率和氮素利用效率的影响, 旨在探讨不同株高类型夏玉米氮素吸收利用特性, 为夏玉米高产高效生产中氮肥科学管理提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

本试验于 2013~2014 年在山东农业大学试验农场进行。试验地土壤类型为壤土, 0—20 cm 土层土壤有机质含量 1.03%、全氮 0.80 g/kg、碱解氮 92.46 mg/kg、速效磷 52 mg/kg、速效钾 108 mg/kg。选用高秆玉米品种鲁单 981 (LD981)、中秆郑单 958 (ZD958) 和矮秆登海 661 (DH661) 为试验材料。试验设置 2 个种植密度, 分别为 67500 (低密度) 和 82500 株/hm² (高密度); 3 个施氮量, 分别为 0、180 和 270 kg/hm², 共 18 个处理, 每个处理重复 3 次, 等行距种植, 行距 60 cm, 随机排列。施用氮肥为尿素, 分别在拔节期和大喇叭口期按照 4 : 6 的比例施入。各处理基施磷肥 (P₂O₅) 120 kg/hm² 和钾肥 (K₂O) 240 kg/hm², 磷肥为过磷酸钙, 钾肥为氯化钾。6 月 16 日播种, 按高产田水平进行田间管理。

1.2 测定项目与方法

在开花和成熟期分别取 5 株长势均匀一致的植株, 开花期植株分为叶片和茎鞘两部分, 成熟期植株分别叶片、茎鞘、穗轴和籽粒 4 部分, 105℃ 杀青 30 min, 75℃ 烘干至恒重, 称重后粉碎保存待测。成熟期各处理选取 15 株长势一致植株, 测定其株高

和穗位高; 每个小区收获玉米 3 行, 连续 30 个果穗考种, 测产。植株和籽粒全氮含量采用浓 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 联合消煮后, 用 BRAN + LUEBBE 公司的 AA3 连续流动分析仪测定。

1.3 相关参数计算

植株总氮积累量 (total nitrogen accumulation amount, TNAA, kg/hm^2) = 成熟期单株干重 \times 密度 \times 成熟期单株含氮量 (%) ^[15]

氮素收获指数 (nitrogen harvest index, NHI) = 籽粒吸氮量/植株吸氮量 $\times 100\%$ ^[16]

氮肥农学利用率 (nitrogen agronomic efficiency, NAE, kg/kg) = (施氮区籽粒产量 - 无氮区籽粒产量)/施氮量 ^[16]

氮素利用效率 (nitrogen use efficiency, NUE, kg/kg) = 籽粒产量/地上部氮积累量 ^[15]

氮素转运效率 (nitrogen translocation efficiency, NTE) = 营养器官氮素转运量/开花期营养器官氮素积累量 $\times 100\%$ ^[15]

氮素转运对籽粒的贡献率 (nitrogen contribution proportion, NCP) = 营养器官氮素转运量/成熟期籽粒氮素积累量 $\times 100\%$ ^[15]

1.4 数据处理

采用 SigmaPlot10.0 进行数据处理、作图, 采用 SPSS 16.0 进行方差分析和 Duncan'S 新复极差法多重比较。

2 结果与分析

2.1 产量及其构成因素

表 1 表明, 品种、密度和施氮量 3 个因素对不同株高夏玉米的籽粒产量影响显著, 密度和施氮量对产量的互作效应显著, 但密度、施氮量和品种的交互作用对其影响不显著, 籽粒产量变化总趋势是增施氮肥有利于产量增加, 高密度种植条件下的产量较低密度显著增加。低密度条件下, DH661 的 N270 处理产量较 N0 和 N180 分别提高 16.1% 和 0.6%, ZD958 分别提高 17.6% 和 5.2%, LD981 分别提高 15% 和 0.2%; 高密度条件下, DH661 的 N270 处理产量较 N0 和 N180 分别提高 18.1% 和 2.6%, ZD958 分别提高 11.0% 和 3.4%, LD981 分别提高 21.3% 和 6.6%。同一施肥水平下, 夏玉米产量在高密度种植条件下高于低密度种植条件。在 N0 条件下, DH661、ZD958 和 LD981 的产量在高密度较低密度分别提高 4.4%、13.9% 和 10.45%, N180 条件下分别提高

4.2%、9.3% 和 9.6%, N270 条件下分别提高 6.2%、7.4% 和 16.6%。此外, 品种、密度和施氮量 3 个因素对籽粒产量构成因素的影响显著, 密氮互作效应显著, 但三者之间的交互作用差异不显著。同一种植密度条件下, 施氮处理较不施氮处理的千粒重和穗粒数提高。同一施氮水平下, 随着种植密度的增加不同株高夏玉米的穗粒数和千粒重降低 (表 1)。

2.2 氮素积累和转运特性

随着施氮量的增加, 3 品种的氮素积累量均显著体提高, 中高秆品种的氮积累量大于矮秆品种的。低密度下, DH661 的 N180 和 N270 处理的群体氮素积累量较不施氮处理分别增加了 7.8% 和 20.0%, ZD958 分别增加了 10.1% 和 34.2%, LD981 分别增加了 8.7% 和 15.6%; 高密度下, DH661 的 N180 和 N270 处理氮素积累量较 N0 处理分别增加了 6.6% 和 19.9%, ZD958 分别增加了 9.0% 和 20.9%, LD981 分别增加了 10.5% 和 17.1%。此外, 中秆品种的氮素收获指数、氮素转运效率和氮素转运对籽粒的贡献率均高于矮秆品种的。3 个品种相比较, ZD958 的氮素收获指数、氮素转运效率和氮素转运对籽粒的贡献率均最大, 分别比 DH661 高 6.82%、31.41% 和 33.95%, 比 LD981 高 2.86%、19.60% 和 28.22%。高密度下, ZD958 的氮素收获指数、氮素转运效率、氮素转运对籽粒的贡献率较低密度分别提高 3.00%、13.90% 和 16.60%, LD981 分别提高 5.67%、31.55% 和 26.27%, 而 DH661 分别降低了 0.75%、15.25% 和 22.76%。同时, 3 品种的氮素转运效率、氮素转运对籽粒的贡献率因施氮量增加而显著降低 (图 1)。

2.3 氮素利用效率

由表 2 可知, 品种、密度和施氮量对夏玉米氮肥偏生产力影响极显著, 而它们之间的互作效应影响不显著。品种和密度对氮肥农学利用率影响极显著, 施氮量对其影响不显著; 品种与密度、密度与施氮量之间的互作对氮肥农学利用率的影响极显著, 其他因素间的互作影响不显著。随着株高的增加, 氮素吸收效率逐渐增加, 而氮素利用效率逐渐降低。DH661 氮素利用效率平均为 46.2 kg/kg , 较 ZD958 和 LD981 分别高 7.4% 和 39.1%, LD981 的氮素吸收效率为 1.54 kg/kg , 较 ZD958 和 DH661 分别高 18.8% 和 25.0%。高密度下, DH661、ZD958 和 LD981 的氮素利用效率分别提高了 19.3%、4.6%、2.2%。施氮 270 kg/hm^2 条件下, DH661 的氮素利用效率和氮素吸收效率较施氮 180 kg/hm^2 分别降低了 6.2% 和 24.5%,

表 1 种植密度和施氮量对夏玉米产量及其构成因素的影响

Table 1 Effects of plant density and nitrogen rate on grain yield and yield components of summer maize

密度 (plant/hm ²) Density	施氮量 (kg/hm ²) N rate	品种 Hybrid	千粒重 (g) 1000-grain weight	穗粒数 Kernels No. per ear	穗数 (No./hm ²) Ear No.	产量 (kg/hm ²) Yield
67500	0	DH661	326 e	480 e	65113 e	10192 e
		ZD958	300 g	534 b	63199 e	10154 e
		LD981	363 b	457 f	63109 e	10523 e
	180	DH661	352 c	505 d	66260 c	11754 d
		ZD958	321 e	552 a	64258 d	11355 d
		LD981	381 a	486 e	65118 c	12076 c
	270	DH661	352 c	503 d	66917 c	11829 d
		ZD958	333 e	553 a	64999 d	11945 d
		LD981	377 a	500 d	64182 d	12098 c
82500	0	DH661	319 f	416 g	80184 a	10641 e
		ZD958	298 g	505 d	77215 b	11562 d
		LD981	356 c	421 g	77752 b	11626 d
	180	DH661	345 d	451 f	78764 b	12245 c
		ZD958	312 f	515 c	77446 b	12412 c
		LD981	367 b	463 f	78007 b	13236 b
	270	DH661	326 e	480 e	80249 a	12566 c
		ZD958	314 f	521 b	78515 b	12830 c
		LD981	377 a	463 f	80761 a	14104 a
方差分析 Analysis of variance						
密度 Plant density (D)			**	**	**	**
施氮量 N rate (N)			**	**	**	**
品种 Hybrid (H)			*	*	NS	NS
D × N			*	*	*	**
D × H			NS	NS	NS	NS
H × N			**	NS	NS	NS
H × D × N			NS	NS	NS	NS

注 (Note): 同列数据后不同小写字母表示差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in the same column are significantly different at 0.05 probability level; *, ** 分别表示在 5%、1% 水平差异显著 *, ** mean significance at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively; NS表示差异不显著 NS means no significance.

ZD958 分别降低了 2.8% 和 27.1%，LD981 分别降低了 1.1%、29.0%。施氮 270 kg/hm² 条件下，LD981 的氮肥农学利用率较施氮 180 kg/hm² 条件下降低了 15.9%，DH661 和 ZD958 分别提高了 4.7% 和 4.8% (表 2)。

3 讨论

3.1 密氮互作对不同株高夏玉米产量的影响

夏玉米株高与群体冠层结构密切相关，对玉米

产量具有显著影响。株高具有基因型差异，也受环境条件制约。品种的耐密性、密度大小以及水肥条件都会影响株高的变化，史振声等^[20]将不同品种株高的变化归纳为 3 种情况：一是株高随着密度的增加而升高，二是随密度增加而升高，但上升到一定高度不再继续升高；三是并不因密度的增大而发生较大变化，第一种多属于稀植型品种，后两种多属于密植型品种，具有较大的增密增产潜力。袁继超等^[21]认为株高会随着密度的增加呈先上升后下降趋

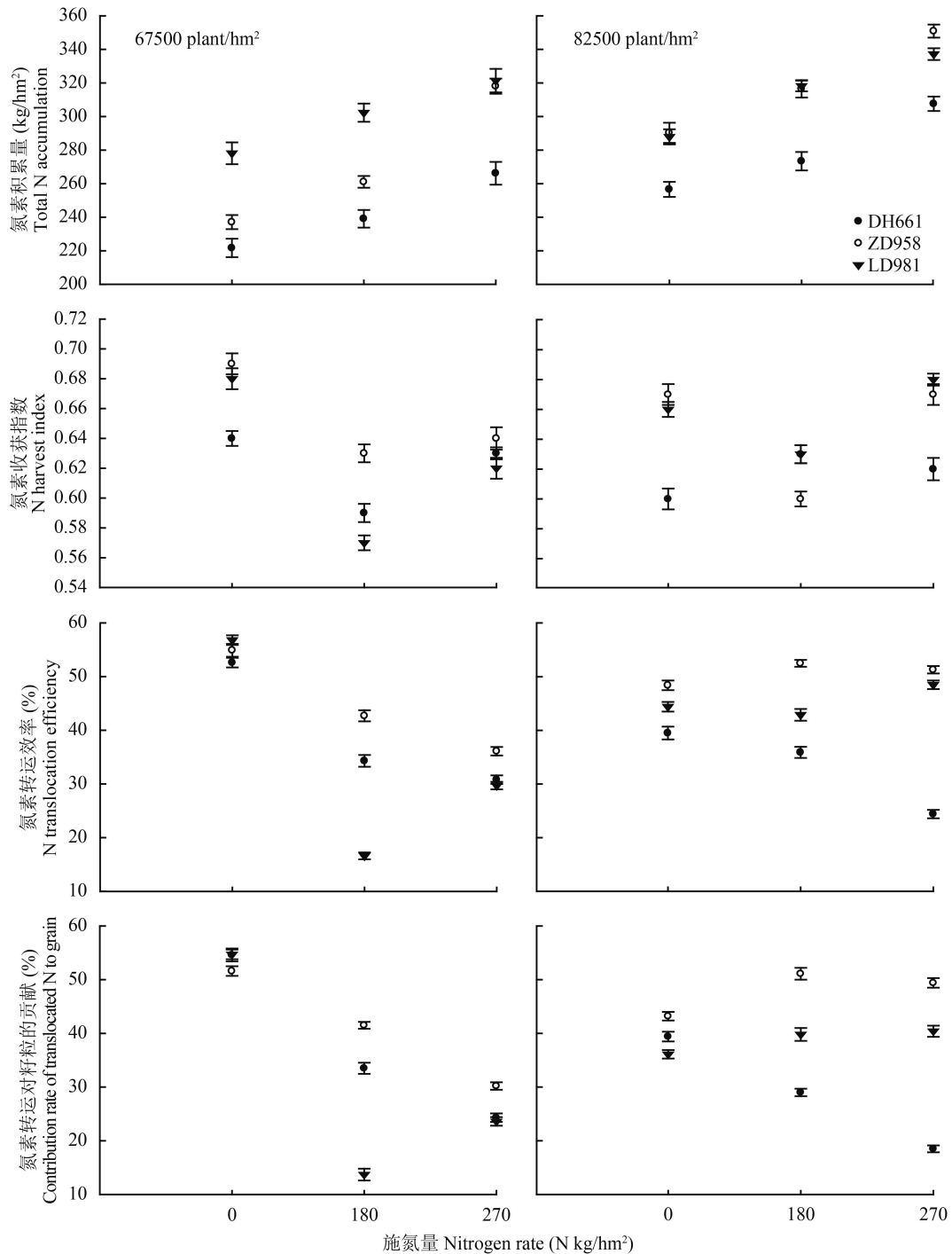


图 1 种植密度和施氮量对不同株高玉米氮素积累和转运的影响

Fig. 1 Effects of plant density and nitrogen supply on nitrogen accumulation and translocation of summer maize

势。本研究表明, 种植密度和施氮量对株高和穗位高的影响不显著(图2、图3)。玉米产量是由单位面积穗数、穗粒数和千粒重组成的, 通过增加种植密度增加穗数是提高产量的有效途径。但是, 种植密度增加必然会引起植株个体间的竞争加剧, 单株产量显著下降, 当单株效应对总产量的影响超过了群体效应时导致群体总产量下降^[22-23]。前人研究认为, 随着种植

密度增加, 穗粒数、千粒重和单穗籽粒干重均显著降低, 其中穗粒数受环境条件的影响波动较大^[24-25], 千粒重具有较高的遗传性, 密度间差异不显著^[26]。本研究表明, 密度由 67500 增至 82500 plant/hm², 3 个品种穗粒数显著降低, 降幅 4.0%~12.9%, 千粒重略有降低, 降幅 0.3%~4.9%, 但因为穗数的显著提高, 高密度下籽粒产量较较低密度显著提高, 其中高

表 2 种植密度和施氮量对夏玉米氮素利用的影响

Table 2 Effects of plant density and nitrogen supply on nitrogen utilization efficiency of summer maize

密度 (plant/hm ²) Plant density	施氮量 (kg/hm ²) Nitrogen rate	品种 Hybrid	氮素农学利用率(kg/kg) NAE	氮素利用效率 (kg/kg) NUE	氮素吸收效率 (kg/kg) NUPE
67500	180	DH661	9.85 d	51.55 a	1.27 c
		ZD958	11.44 c	44.21 c	1.44 b
		LD981	16.23 a	37.76 e	1.80 a
	270	DH661	8.39 e	46.33 b	0.98 d
		ZD958	9.57 de	40.23 d	1.10 d
		LD981	10.97 cd	36.08 e	1.26 c
82500	180	DH661	5.82 f	43.81 c	1.55 b
		ZD958	3.15 f	43.04 c	1.57 b
		LD981	13.92 b	41.75 d	1.82 a
	270	DH661	8.01 e	43.09 c	1.14 d
		ZD958	5.72 f	44.58 c	1.09 d
		LD981	14.38 b	42.57 d	1.31 c
方差分析 Analysis of variance					
密度 Plant density (D)			**	NS	NS
施氮量 N rate (N)			NS	NS	**
品种 Hybrid (H)			**	*	*
H × D			**	*	NS
H × N			NS	*	NS
D × N			**	*	NS
H × D × N			NS	*	NS

注 (Note): 同列数据后不同小写字母表示差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in the same column are significantly different at 0.05 probability level; *, ** 分别表示在 5%、1% 水平差异显著 *, ** mean significance at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively; NS 表示差异不显著 NS means no significance.

秆品种增产 12.5%，中秆品种增产 10.2%，矮秆品种增产 5.0%，此外，施氮有助于千粒重和穗粒数的提高，从而有利于高密度下夏玉米产量的提高。

3.2 密氮互作对不同株高夏玉米氮素利用效率的影响

赵营等^[27]认为，玉米氮转运效率在 30%~50% 之间，随着施氮量的增加而降低；籽粒中 37.2%~57.3% 的氮是来源于营养器官的转运，转运比例随施氮量增加而降低；丁民伟等^[14]认为玉米的氮素转运效率和转运氮贡献率在不施氮时最大，随着施氮量的增加，玉米转运氮贡献率表现出先上升而后下降的趋势即当施氮量超过 150 kg/hm² 时，转运氮贡献率随施氮量的增加显著下降。本研究表明，低密度条件下，增加施氮量后显著降低了矮秆和中秆品种的氮素转运效率和氮素转运贡献率，但提高了高秆品

种的氮素转运效率和氮素转运贡献率；高密度条件下，矮秆品种氮素转运效率和转运氮贡献率因施氮量增加而显著降低，但中秆和高秆品种变化不显著。本试验条件下，3 个品种氮肥偏生产力和氮素利用效率高密度较低密度显著提高；不同种植密度条件下增加施氮量，3 个品种的氮肥偏生产力和氮素利用效率均显著降低，这与我们前期研究结果基本一致^[18,28]。随株高增加，氮素吸收能力逐渐增强，而氮素利用能力逐渐降低，其生理生态机制值得进一步研究和探讨。

4 结论

本研究条件下，增加施氮量和种植密度有利于不同株高夏玉米产量的提高，但不同株高玉米的氮素利用有所差异。低密度 67500 plant/hm² 条件下，

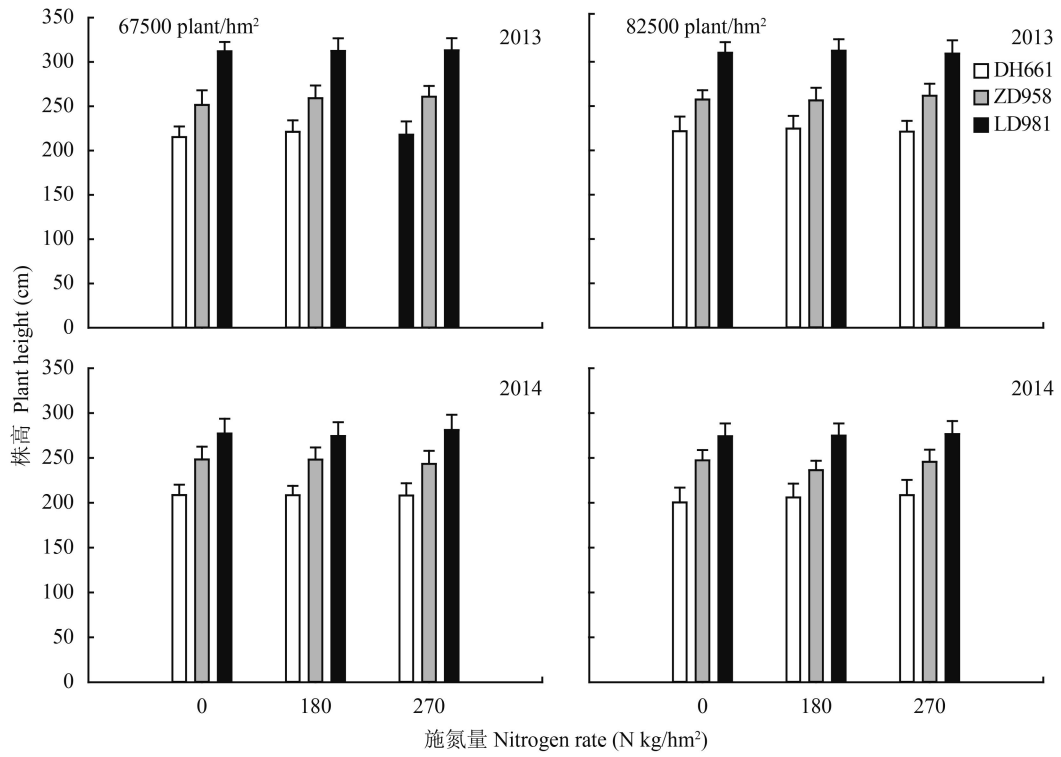


图 2 种植密度和施氮量对夏玉米株高的影响

Fig. 2 Effects of plant density and nitrogen rate on plant height of summer maize

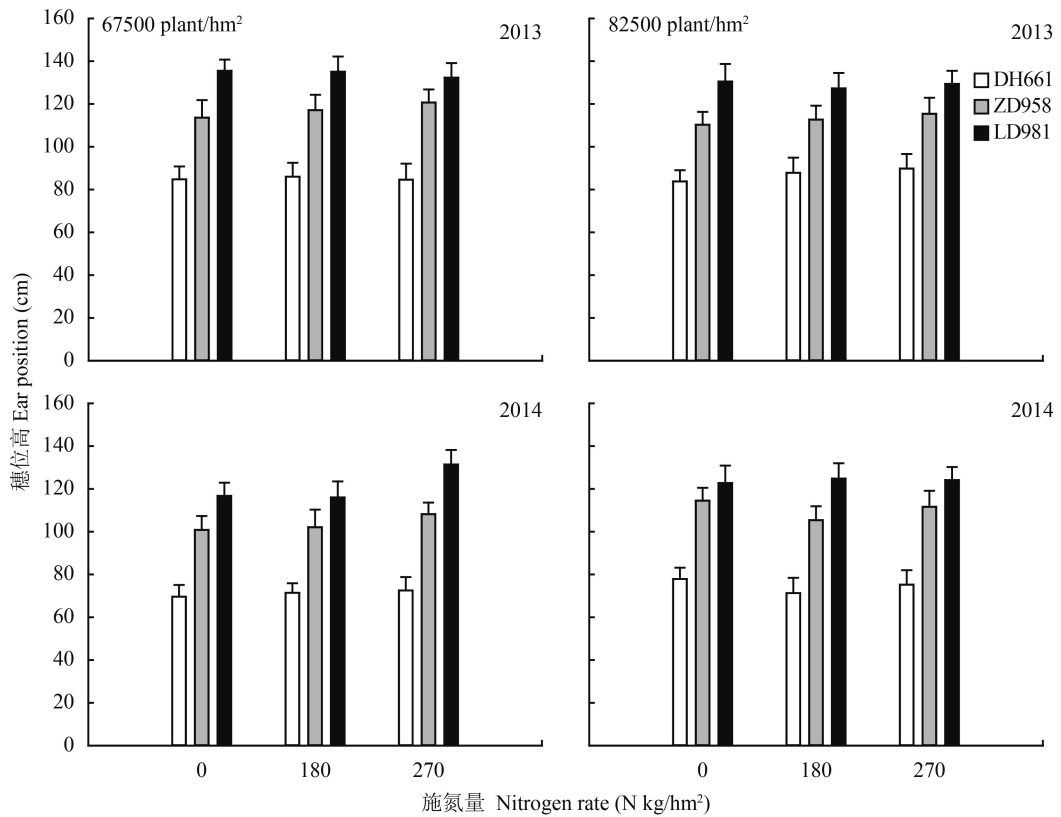


图 3 种植密度和施氮量对夏玉米穗位高度的影响

Fig. 3 Effects of plant density and nitrogen rate on ear position of summer maize

增施氮肥后矮秆和中秆品种的氮素转运效率和氮素转运贡献率显著降低, 而高秆品种的显著提高。高密度 82500 plant/hm² 条件下, 增施氮肥后矮秆品种氮素转运效率和氮素转运贡献率显著降低, 中秆和高秆品种的无显著变化。

参 考 文 献:

- [1] Tollenaar M, Lee E A. Yield potential, yield stability and stress tolerance in maize [J]. *Field Crops Research*, 2002, 88: 161–169.
- [2] 赵久然, 孙世贤. 对超级玉米育种目标及技术路线的再思考[J]. *玉米科学*, 2007, 15(1): 21–23.
Zhao J R, Sun S X. Rethinking on breeding objective and technical route of super-maize[J]. *Journal of Maize Science*, 2007, 15(1): 21–23.
- [3] 关义新, 林葆, 凌碧莹. 光、氮及其互作对玉米幼苗叶片光合和碳、氮代谢的影响[J]. *作物学报*, 2000, 26(6): 806–812.
Guan Y X, Lin B, Ling B Y. The interactive effects of growth light condition and nitrogen supply on maize seedling photosynthetic traits and metabolism of carbon and nitrogen[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2000, 26(6): 806–812.
- [4] 王忠孝. 山东玉米[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999. 146–151, 637–638.
Wang Z X. *Shandong maize*[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1999. 146–151, 637–638.
- [5] Alam M M, Basher M M, Karim A, *et al.* Effect of rate of nitrogen fertilizer and population density on the yield and yield attributes of maize[J]. *Pakistan Journal of Biological Science*, 2003, 6(20): 1770–1773.
- [6] 周旭梅, 高旭东, 何晶. 75个春玉米杂交组合主要农艺性状与产量的相关和通径分析[J]. *山东农业科学*, 2013, 45(5): 48–52.
Zhou X M, Gao X D, He J. Correlation and path analysis of main agronomic traits with yield of 75 spring maize hybrids[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2013, 45(5): 48–52.
- [7] 白向历, 高洪敏, 王秀凤. 不同玉米品种相关农艺性状与产量的通径分析[J]. *辽宁农业科学*, 2012, (4): 12–15.
Bai X L, Gao H M, Wang X F. Correlation and path analysis of main agronomic traits with yield of different maize hybrids[J]. *Liaoning Agricultural Sciences*, 2012, (4): 12–15.
- [8] 任军, 张志军, 张建新. 玉米理想株型育种与超级玉米育种[J]. *农业与技术*, 2006, 26(2): 51–52.
Ren J, Zhang Z J, Zhang J X. Breeding for ideotype and super-maize[J]. *Agriculture & Technology*, 2006, 26(2): 51–52.
- [9] Dudley J W. Selection for rind punctures resistance in two maize populations[J]. *Crop Science*, 1994, 34(6): 1458–1460.
- [10] 易镇邪, 王璞, 陈平平, 等. 氮肥类型对夏玉米氮素吸收和利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(2): 472–478.
Yi Z X, Wang P, Chen P P, *et al.* Effect of different types of nitrogen fertilizer on nitrogen absorption and utilization of summer maize[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(2): 472–478.
- [11] 郑伟, 何萍, 高强, 等. 施氮对不同土壤肥力玉米氮素吸收和利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(2): 201–309.
Zhen W, He P, Gao Q, *et al.* Effects of N application on nitrogen absorption and utilization of spring maize under different soil fertilities[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(2): 201–309.
- [12] 何萍, 金继运, 林葆. 氮肥用量对春玉米叶片衰老的影响及其机理研究[J]. *中国农业科学*, 1998, 31(3): 66–70.
He P, Jin J Y, Lin B. The effects of nitrogen rate on spring maize leaf senescence characteristics and physiological mechanisms[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1998, 31(3): 66–70.
- [13] Osaki M, Shinano T, Tadano T. Redistribution of carbon and nitrogen compounds from the shoot to the harvesting organs during maturation in field crops[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1991, 37: 117–128.
- [14] 丁民伟, 杜雄, 刘梦星, 等. 氮素运筹对夏玉米产量形成与氮素利用效果的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(5): 1100–1107.
Ding M W, Du X, Liu M X, *et al.* Effects of nitrogen management modes on yield formation and nitrogen utilization efficiency of summer maize[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(5): 1100–1107.
- [15] 吕鹏, 张吉旺, 刘伟, 等. 施氮量对超高产夏玉米产量及氮素吸收利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(4): 825–860.
Lv P, Zhang J W, Liu W, *et al.* Effects of nitrogen application on yield and nitrogen use efficiency of summer maize under super-high yield conditions[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(4): 825–860.
- [16] Jin L B, Cui H Y, Zhang J W, *et al.* Effects of integrated agronomic management practices on yield and nitrogen efficiency of summer maize in North China[J]. *Field Crop Research*, 2012, 134: 30–35.
- [17] 靳立斌, 张吉旺, 李波, 等. 高产高效夏玉米的冠层结构及其光合特性[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(12): 2430–2439.
Jin L B, Zhang J W, Li B, *et al.* Canopy structure and photosynthetic characteristics of high yield and high nitrogen efficiency summer maize[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(12): 2430–2439.
- [18] 曹胜彪, 张吉旺, 董树亭, 等. 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, *et al.* 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.
- [19] 李利利, 张吉旺, 董树亭, 等. 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.
Li L L, Zhang J W, Dong S T, *et al.* Characteristics of accumulation, transition and distribution of assimilate in summer maize varieties with different plant height[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(6): 1080–1087.
- [20] 史振声, 孙萌, 李凤海, 等. 辽宁西部地区玉米密植潜力研究[J]. *玉米科学*, 2010, 18(4): 99–102.
Shi Z S, Sun M, Li F H, *et al.* Study on potential densities of maize in the west of Liaoning Province[J]. *Journal of Maize Science*, 2010, 18(4): 99–102.
- [21] 袁继超, 何永培, 朱庆森, 等. 攀西地区玉米群体密度效应研究[J]. *西南农业学报*, 2004, 17(1): 26–30.
Yuan J C, He Y P, Zhu Q S, *et al.* Effects of density on growth and yield of maize in Panxi region[J]. *Southwest China Journal of*

- Agricultural Sciences, 2004, 17(1): 26–30.
- [22] 刘伟, 吕鹏, 苏凯, 等. 种植密度对夏玉米产量和源库特性的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(7): 1737–1743.
Liu W, Lü P, Su K, *et al.* Effects of planting density on the grain yield and source-sink characteristics of summer maize[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(7): 1737–1743.
- [23] 陈传永, 侯海鹏, 李强, 等. 种植密度对不同玉米品种叶片光合特性与碳、氮变化的影响[J]. 作物学报, 2010, 36(5): 871–878.
Chen C Y, Hou H P, Li Q, *et al.* Effects of planting density on photosynthetic characteristics and changes of carbon and nitrogen in leaf of different corn hybrids[J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(5): 871–878.
- [24] Goldsworthy P R, Fischer N M. The physiology of tropical field crops[M]. New York: Wiley, 1984. 213–248.
- [25] Jacobs B C, Pearson C J. Potential yield of maize, determined by rates of growth and development of ears[J]. Field Crops Research, 1991, 27: 281–298.
- [26] Amanullah, Shah P. Timing and rate of nitrogen application influence grain quality and yield in maize planted at high and low densities[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2010, 90(1): 21–29.
- [27] 赵营, 同延安, 赵护兵. 不同供氮水平对夏玉米养分累积、转运及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(5): 622–627.
Zhao Y, Tong Y A, Zhao H B. Effects of different N rates on nutrients accumulation, transformation and yield of summer maize[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(5): 622–627.
- [28] 范霞, 张吉旺, 任佰朝, 等. 不同株高夏玉米品种的氮素吸收与利用特性[J]. 作物学报, 2014, 40(10): 1830–1838.
Fan X, Zhang J W, Ren B Z, *et al.* Nitrogen uptake and utilization of summer maize hybrids with different plant heights[J]. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40(10): 1830–1838.