

氮密互作对不同株型玉米形态、光合性能及产量的影响

肖万欣, 刘晶, 史磊, 赵海岩, 王延波

(辽宁省农业科学院玉米研究所, 沈阳 110161)

摘要: 【目的】阐明不同株型玉米在氮素和密度互作下获得高产的形态生理互利机理, 进一步提升密植玉米综合生产力。【方法】2014—2015年, 在大田条件下, 采用裂-裂区试验设计, 以不同株型玉米品种为主区, 氮素 (N_1 : 0, N_2 : 90 kg N·hm⁻² 和 N_3 : 180 kg N·hm⁻²) 为裂区、密度 (D_1 : 45 000 株/hm², D_2 : 60 000 株/hm² 和 D_3 : 75 000 株/hm²) 为裂裂区, 测定了植株形态、叶片光合性能和产量等指标。【结果】施氮对节间长度、叶倾角、叶色值、粒重和产量的影响程度均高于密度调控, 茎粗、光合速率和穗粒数对增密响应程度较高。与平展型玉米相比, 紧凑型玉米茎粗随密度提高降幅较小, 第1—3节间长度对增密响应迟钝, 随施氮量增加显著缩短 ($P_{N_2-N_3}=0.004-0.028$), 第4—5节间长度对增密的负响应幅度 (10.9%) 均高于平展型玉米同节间长度对其的正响应幅度 (3.3%)。施氮可降低紧凑型玉米棒三叶叶倾角 $2.9^\circ \pm 1.1^\circ$, 增密后, 其穗下叶叶倾角降幅较高。紧凑型玉米叶色值对施氮量的响应峰值 (N_3) 高于平展型玉米 (N_2), 增密对其光合速率的负效应相对较小, 在 N_3 和 D_3 处理下, 其叶色值和光合速率均高于平展型玉米。紧凑型玉米穗粒数与粒重受氮密调控影响比平展型玉米小, 其收获指数较高, 且在氮/密处理间差异均不显著 ($P_{N_1-N_3}=0.16$, $P_{D_1-D_3}=0.12$), 而平展型玉米在氮/密处理间差异均达显著或极显著水平 ($P_{N_1-N_3}=0.03$, $P_{D_1-D_3}<0.01$)。紧凑型玉米和平展型玉米分别在 N_3D_3 和 N_3D_1 处理下获得较高产量, 增密和施氮对其籽粒产量的贡献比分别是 1:2.3 和 1:4.0。【结论】与平展型玉米相比, 紧凑型玉米茎基部横/纵向生长对氮密协同提高具有较强的适应能力, 施氮可降低紧凑型玉米棒三叶叶倾角, 提高穗位叶光合性能。紧凑型玉米在高密高氮处理下较好的形态生理协调性保证了生育后期相对较高的物质转化效率, 最终获得较高群体产量。

关键词: 玉米; 株型; 氮素; 种植密度; 形态; 光合性能; 产量

Effect of Nitrogen and Density Interaction on Morphological Traits, Photosynthetic Property and Yield of Maize Hybrid of Different Plant Types

XIAO WanXin, LIU Jing, SHI Lei, ZHAO HaiYan, WANG YanBo

(Maize Research Institute, Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang 110161)

Abstract: 【Objective】The purpose of this study is to elucidate morphological and physiological mutual beneficial mechanism for compact type maize hybrid under nitrogen and density interaction, for further raise overall productivity of density tolerant maize hybrid. 【Method】Plant morphological trait, ear leaf photosynthetic ability and yield were determined under field experimental condition in 2014 and 2015. Split-split plot design, 2 plant type hybrids (compact plant type and flat plant type) as the main plot, 3 nitrogen treatments (N_1 : 0, N_2 : 90 kg N·hm⁻² and N_3 : 180 kg N·hm⁻²) as the split plot, 3 plant densities (D_1 : 45 000 plant/hm², D_2 : 60 000 plant/hm² and D_3 : 75 000 plant/hm²) as the sub-split plot. 【Result】The effects of nitrogen on internode length, leaf angle, SPAD value, kernel weight per ear and yield were stronger than that of density on those parameters. Stem diameter, P_n and kernel

收稿日期: 2017-02-27; 接受日期: 2017-05-08

基金项目: 国家自然科学基金 (31601262)、辽宁省科技厅项目 (2014026)、辽宁省人社厅项目 (辽农院人字[2015]19号)

联系方式: 肖万欣, Tel: 024-31029788; E-mail: wanxinx2013@163.com。通信作者王延波, E-mail: lnwangyanbo@163.com

number per ear was sensitive to density increasing. Compared with flat type hybrid, decreased range of stem diameter was small, and response sensitivity from 1 to 3 internode length was slowness with plant density increased for compact type hybrid. However, the 1-3 internode length was shortened significantly with nitrogen input amount increased ($P_{N_2 \rightarrow N_3} = 0.004-0.028$), negative response range of 4-5 internode length for compact type hybrid (10.9%) was higher than positive response range of 4-5 internode length for flat type hybrid (3.3%). Leaf angle of compact type hybrid was down to $2.9 \pm 1.1^\circ$ with nitrogen input. The leaf angle of leaf below ear leaf changed to a relatively lower with plant density increased. Response peak value of SPAD to nitrogen for compact type hybrid (N_3) was higher than that for flat type hybrid (N_2). The negative effect of Pn caused by density increasing was relatively small for compact type hybrid. SPAD and Pn of ear leaf for compact type hybrid were higher than that for flat type hybrid in N_3 and D_3 treatment. Altogether, the effect of nitrogen and density interaction on kernel number and kernel weight per ear for compact type hybrid was smaller than that for flat type hybrid. Harvest index of compact type hybrid was relatively high, which the difference between $N \times D$ interaction treatment ($P_{N_1 \rightarrow N_3} = 0.16$, $P_{D_1 \rightarrow D_3} = 0.12$) was no significant, however, that the difference between that ($P_{N_1 \rightarrow N_3} = 0.03$, $P_{D_1 \rightarrow D_3} < 0.01$) of flat type hybrid was very significant. The highest yield record was obtained in N_3D_3 and N_3D_1 treatments for compact and flat type hybrid, respectively. And their yield gain ratio for density and nitrogen was 1 : 2.3 and 1 : 4.0, respectively. 【Conclusion】 Compared with flat type hybrid, compact type hybrid had a more adaptable ability of regulating cross and longitudinal growth of basal part of stem. Nitrogen application could reduce leaf angle of leaf above ear leaf, ear leaf and leaf below ear leaf, which could enhance ear leaf light use efficiency. Proper morphophysiological coordinate ability keeps a higher dry matter transfer rate for the compact type hybrid under higher density and higher nitrogen fertilizer condition at kernel weight formation stage, thus achieving a higher population yield.

Key words: maize; plant type; nitrogen; plant density; morphology; photosynthetic property; yield

0 引言

【研究意义】玉米是全球第一大粮食作物^[1], 2012年, 中国玉米产量超过稻谷, 成为第一大粮食作物^[2]。据FAO报道, 2014年中国玉米收获面积是美国的1.10倍, 而平均单产仅为美国的0.54倍^[3]。目前, 美国玉米种植密度为8.55—10.95万株/hm², 而中国玉米种植密度为5.25—6.00万株/hm²^[4], 可见, 提高种植密度和品种耐密性对于实现中国玉米高产意义重大。同时, 面对人口不断增加、可耕地面积日趋紧张的局面, 还需兼顾提高养分资源利用效率, 才能保证农业可持续发展^[5-7]。【前人研究进展】合理的密度是玉米利用光热资源构建良好群体结构、优化群体光合生理指标的基础, 适宜的氮肥施用量是其利用适宜密度充分发挥群体优势进行光合生产的营养物质保障, 它可以通过影响穗粒数和粒重来影响产量^[8], 在作物生产中, 二者要高度协调^[9]。前人研究结果表明, 随着种植密度的提高, 玉米氮素吸收利用效率呈现持续递增或先增加后减少的趋势^[10-12]。盛耀辉等^[13]研究认为, 氮肥和密度间互作效应显著, 在一定范围内可以相互促进。在实际生产中, 可通过氮肥密度互作的途径, 在确定适宜的播种量和施氮量的条件下, 有效地利用它们间交互效应来提高玉米产量。周江明等^[14]研究则认为, 氮肥和密度的互作为负效应, 对水稻产量有相互抑制作用, 提高密度时氮肥用量不宜过高。可见, 氮

密互作对作物产量的作用机理尚无定论。另外, 不同株型玉米品种形态结构^[15-16]、光能利用^[17-20]、物质积累与分配^[21-22]和产量^[15]对氮素或密度的响应程度均具有明显差异。【本研究切入点】目前, 关于对氮素与密度互作机理研究, 大多数学者分别采用过1个^[9, 11-13, 23-25]、同种株型^[26]或不同株高^[27]的品种, 但是, 很少选用不同株型品种进行比较研究。在氮素与密度互作下, 尤其是在高产最佳密度下, 研究氮素对不同株型玉米冠层形态结构、光合性能及产量形成的协同调控增产机理更是鲜见报道。【拟解决的关键问题】从不同株型玉米品种形态、光合性能和产量对氮素和密度的响应特征及氮密互作对它们的影响角度, 阐明紧凑型玉米形态生理互利增产机理, 为进一步提升密植玉米综合生产力提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

试验地点位于辽宁省沈阳市沈北新区试验基地(42°03'N, 123°57'E)。2014年5月5日播种, 9月29日收获; 2015年4月29日播种, 9月30日收获。试验地为草甸土, 耕层(0—30 cm)土壤平均基础肥力为有机质含量22.0 g·kg⁻¹, 速效氮含量72.2 mg·kg⁻¹, 有效磷含量26.8 mg·kg⁻¹, 速效钾含量117.6 mg·kg⁻¹。采用筛选出来的棒三叶叶倾角差异较大的紧凑型玉米

(compact type) 郑单 958 (ZD958) 与平展型玉米 (flat type) 辽单 120 (LD120) 作为供试材料, 品种形态特征见表 1。

采用裂-裂区设计, 品种为主区, 氮素水平为裂区, 种植密度为裂-裂区, 设 3 个氮素处理 ($0 \text{ (N}_1\text{)}$ 、 $90 \text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2} \text{ (N}_2\text{)}$ 、 $180 \text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2} \text{ (N}_3\text{)}$)、3 个种植密度处理 ($45\ 000 \text{ 株}/\text{hm}^2 \text{ (D}_1\text{)}$ 、 $60\ 000 \text{ 株}/\text{hm}^2 \text{ (D}_2\text{)}$ 、 $75\ 000 \text{ 株}/\text{hm}^2 \text{ (D}_3\text{)}$)。小区行长 5 m, 垄距 0.6 m, 5 行区, 3 次重复, 观察道宽度 1 m。氮素来源为尿素, 1/4 氮肥做底肥于春播时开沟施入, 3/4 氮肥于拔节期追施。在整个生育期内保证良好的水分供应, 及时浇水、除草、灭虫, 保证植株有良好的生长环境。

表 1 参试品种形态特征

Table 1 Morphological traits of Zhengdan 958 and Liaodan 120

指标	位置	郑单 958	辽单 120
Parameter	Location	ZD958	LD120
株高	—	263.6±7.0	310.5±9.9
Plant height (cm)			
穗位高	—	116.5±7.2	135.8±7.2
Ear height (cm)			
叶倾角	穗上叶	18.3±3.2	24.4±5.5
Leaf angle (°)	Above ear leaf		
	穗位叶	26.6±7.7	29.6±6.2
	Ear leaf		
	穗下叶	17.3±2.2	25.8±5.2
	Below ear leaf		

1.2 测定项目与方法

在距观察道 1 m 以外的群体内部, 连续选择 3 株生长一致的植株用半圆仪测定棒三叶 (穗上叶、穗位叶和穗下叶) 主叶脉与主茎的夹角; 用钢尺测定气生根以上第一节至第六节之间长度, 用电子卡尺测定气生根以上第一节间中点的窄面宽度 (茎粗)。连续选择 5 株有代表性植株用 SPAD-502 活体叶绿素分析仪测定穗位叶中部上表面叶绿素含量。在晴朗无云条件下, 在 9:00—11:00 应用美国 LI-COR 公司生产的 LI-6400 光合测定系统对穗位叶光合参数进行了定株测定 (每处理 3 株), 测定部位是叶片中部上表面, 流速 $500 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$, 内置红蓝光源光量子通量密度 (PPFD) 为 $2\ 000 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

收获前, 采取上述方法在群体内部选取有代表性植株 3 株, 105°C 杀青 30 min 后, 80°C 烘干至恒重。按照收获指数=籽粒干重/地上部总干重, 计算收获指数。人工收穗, 2014 年, 收取小区中间 3 行中的 2 行,

测产面积 6 m^2 ; 2015 年, 收取小区中间 3 行, 测产面积 9 m^2 , 收获后放到晾晒场自然风干, 当籽粒水分 $\leq 25\%$ 时, 应用铁岭市农业科学院生产的玉米脱粒机脱粒, 用 PM-8188 谷物水分测定仪测定籽粒含水量, 按测产面积折算成公顷产量, 籽粒产量以 14% 标准水计算。

收获后, 每处理选取具有代表性的果穗 5 穗, 单穗脱粒, 在 50°C 的烘箱内烘干至恒重, 测定单株穗粒数和穗粒重。

1.3 数据处理与统计分析

所有指标均按 DPS v8.01 中“裂-裂区试验设计”进行统计分析, 应用 Sigma Plot 10.0 软件制图。分析不同株型玉米测定指标对氮素或密度响应特征时, 均采用拟分析处理下 3 个密度或氮素处理的所有数据均值进行比较。氮素 (N)/密度 (D) 处理间测定指标变幅依据如下公式计算: $(\text{N}/\text{D}_{\text{最大值}} - \text{N}/\text{D}_{\text{最小值}}) / \text{N}/\text{D}_{\text{最小值}} \times 100\%$ 。

2 结果

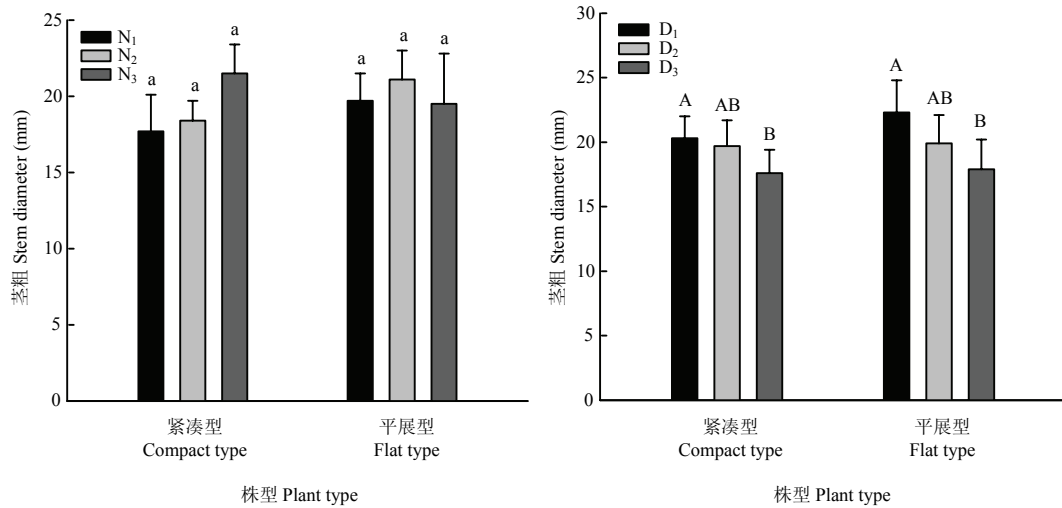
2.1 茎粗

灌浆期, 紧凑型玉米茎粗随施氮量的增加而增加, N_3 处理下茎粗较高, 比 N_1 处理下茎粗提高 21.3%; 平展型玉米在 N_2 处理下茎粗较高, 比 N_1 处理下茎粗提高 7.1% (图 1)。增密极显著地降低玉米茎粗, D_1 至 D_3 处理, 紧凑型玉米茎粗降幅 (15.5%) 小于平展型玉米 (24.5%)。

2.2 节间长度

灌浆期, 紧凑型和平展型玉米第 1—3 节间长度 N_2 至 N_3 处理依次分别降低了 65.8%、24.9%、20.8% 和 6.3%、12.0%、6.7%, 且紧凑型玉米第 1—3 节间长度在 N_2 与 N_3 处理间差异均达显著或极显著水平, 平展型玉米第 3 节间长度在 N_2 与 N_3 处理间差异显著 (图 2-左)。

紧凑型玉米不同节间长度随密度的提高总体上呈递减趋势, 而平展型玉米第 1—3 节间长度随密度提高呈先增长后下降趋势, 第 4—5 节间则随增密呈正响应趋势, 且节间伸长幅度随节位提高而增大 (1.1%→5.5%) (图 2-右)。紧凑型玉米第 1—3 节间长度 D_1 至 D_3 处理平均降幅 (7.3%) 低于平展型玉米同节间平均降幅 (13.2%), 而紧凑型玉米第 4 和第 5 节节间长度 D_1 至 D_3 处理平均降幅 (10.9%) 高于平展型玉米对应节间长度平均增幅 (3.3%)。氮密互作对第 3 ($P=0.02$) 和第 4 节间长度 ($P=0.01$) 的影响均达显著水平。



小写字母表示同处理间在 0.05 水平上差异显著，大写字母表示在 0.01 水平上差异显著。下同
Lowercase letter denotes significant at 0.05 level, capital letter means significant at 0.01 level at same nitrogen or density treatments. The same as below

图 1 氮素（左）和密度（右）对不同株型玉米茎粗的影响

Fig. 1 Effect of nitrogen (left) and density (right) on stem diameter of two plant type hybrids

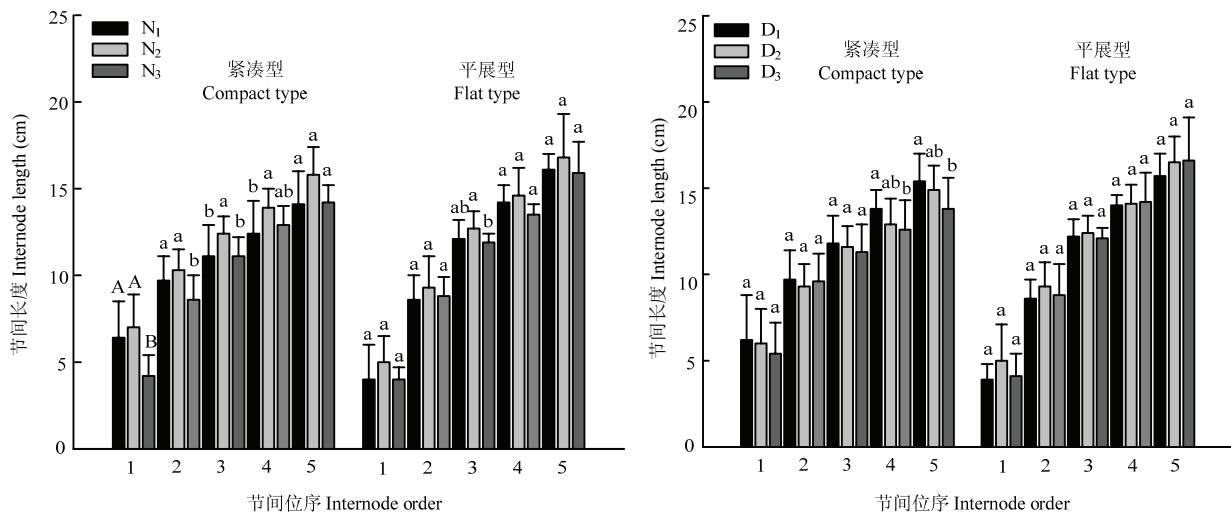


图 2 氮素（左）和密度（右）对不同株型玉米节间长度的影响

Fig. 2 Effect of nitrogen(left) and density(right) on internode length of two plant type hybrids

2.3 叶倾角

灌浆期，N₁ 至 N₃ 处理，紧凑型玉米穗上叶、穗位叶和穗下叶叶倾角分别降低 2.1°、4.2°和 2.4°，而平展型玉米棒三叶叶倾角受氮素调控效应较小（图 3-左）；D₁ 至 D₃ 处理，紧凑型玉米棒三叶叶倾角平均变幅（10.6%）高于平展型玉米（7.1%），其中，穗下叶叶倾角降幅（8.0%）比平展型玉米高 3.0%（图 3-右）。

2.4 叶色值

灌浆期，紧凑型玉米在不同氮密处理下穗位叶平均叶色值（49.8）高于平展型玉米（46.5）。随着施氮量的增加，紧凑型玉米叶片叶色值逐渐增加，在 N₃ 处理下表现较高；平展型玉米在 N₁ 至 N₂ 处理叶色值极显著升高，继续施氮后，其叶色值下降（图 4-左）。D₁ 至 D₃ 处理，紧凑型玉米降幅（11.5%）高于平展型玉米（2.6%），在密度较高处理（D₂ 和

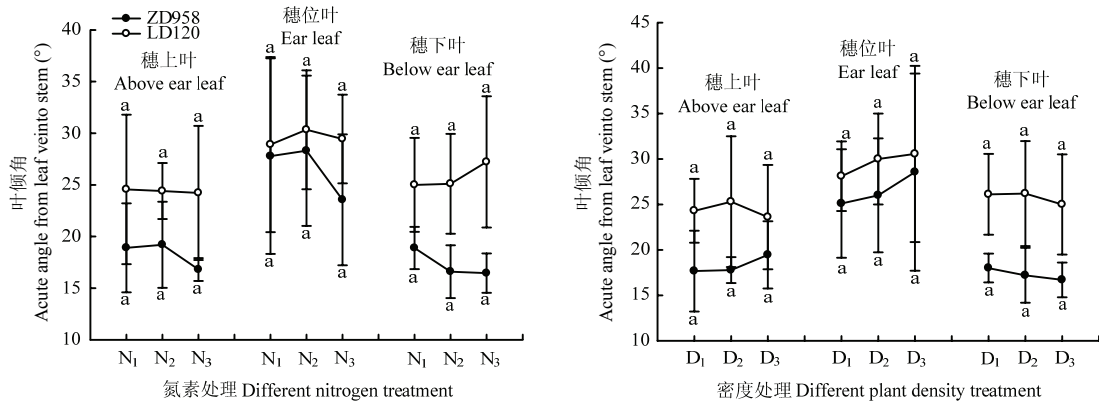


图 3 氮素（左）和密度（右）对不同株型玉米叶倾角的影响

Fig. 3 Effect of nitrogen(left) and density(right) on leaf angle of two plant type hybrids

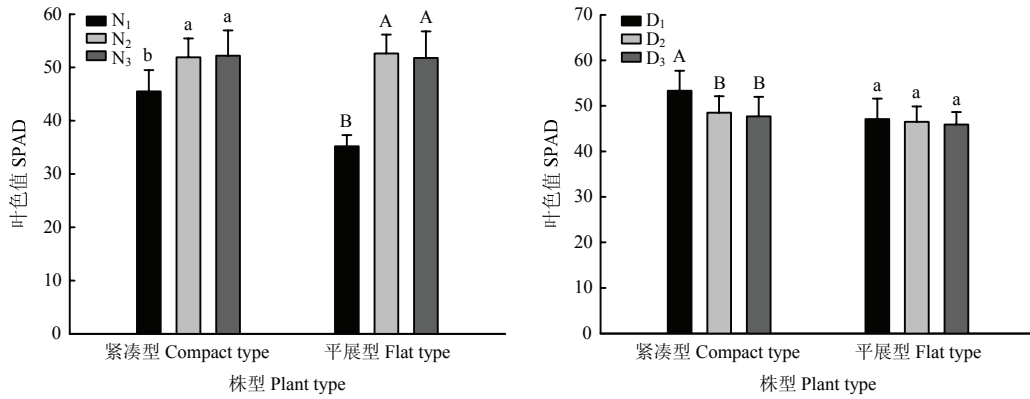


图 4 氮素（左）和密度（右）对不同株型玉米穗位叶叶色值的影响

Fig. 4 Effect of nitrogen(left) and density(right) on SPAD of two plant type hybrids

D₃ 中，其平均叶色值（48.1）比平展型玉米高 4.1%（图 4-右）。

2.5 光合速率 (P_n)

灌浆期，紧凑型玉米在不同氮密处理下穗位叶 P_n 均值（19.4 μmol CO₂·m⁻²·s⁻¹）高于平展型玉米（18.2 μmol CO₂·m⁻²·s⁻¹）。N₂ 处理下光合速率较高，且 N₂ 至 N₃ 处理，紧凑型玉米 P_n 高于平展型玉米(图 5-左)。D₁ 至 D₃ 处理，紧凑型玉米 3 个时期平均降幅(31.8%) 低于平展型玉米（39.3%），在 D₃ 处理下，紧凑型玉米 P_n 均高于平展型玉米（图 5-右）。9 月 3 日和 9 月 13 日，氮密互动对不同株型玉米穗位叶 P_n 的影响均达到了极显著水平 (P<0.01)。

2.6 穗粒数与穗粒重

不同氮密互动处理下，紧凑型玉米两年平均穗粒数（615.1 粒/穗）少于平展型玉米（634.9 粒/穗）。

N₁ 至 N₃ 处理，紧凑型玉米穗粒数两年平均变幅（12.2%）高于平展型玉米穗粒数两年平均增幅（8.0%）（图 6）；D₁ 至 D₃ 处理，紧凑型玉米穗粒数两年平均降幅(16.6%) 低于平展型玉米（22.9%）（图 7）。

紧凑型玉米单穗粒重（0.151 kg/穗）两年平均略低于平展型玉米（0.157 kg/穗）。N₁ 至 N₃ 处理，紧凑型玉米粒重两年平均增幅（27.5%）小于平展型玉米（40.3%）（图 8）；D₁ 至 D₃ 处理，紧凑型玉米粒重两年平均变幅（19.8%）小于平展型玉米粒重两年平均降幅（25.2%）（图 9）。

2.7 收获指数 (HI)

不同氮密互动处理下，紧凑型玉米平均 HI 高于平展型玉米。随着氮素水平和种植密度的升高，紧凑型玉米 HI 均呈微上升趋势，在 N₃ 和 D₃ 处理下达到相

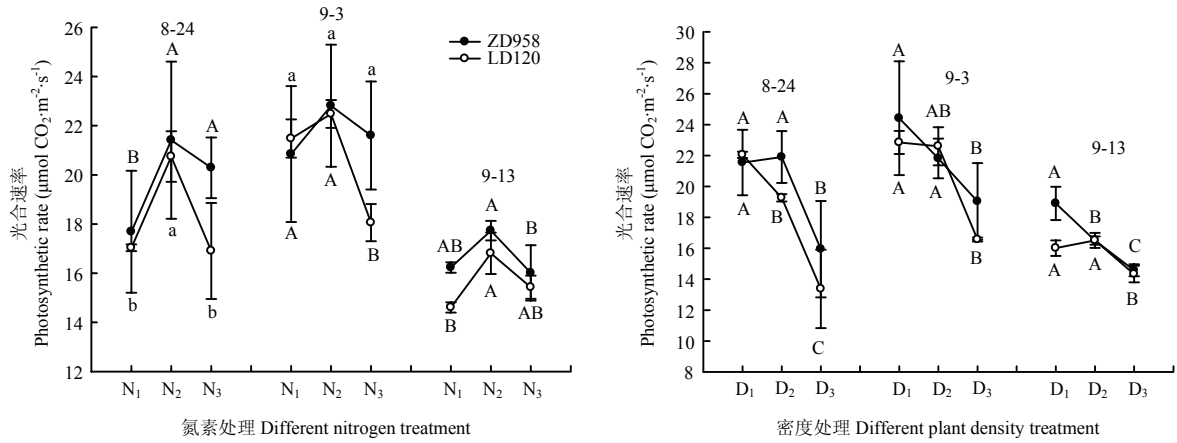


图 5 氮素（左）和密度（右）对不同株型玉米杂交种穗位叶光合速率的影响
 Fig. 5 Effect of nitrogen(left) and density(right) on ear leaf Pn of two plant type hybrids

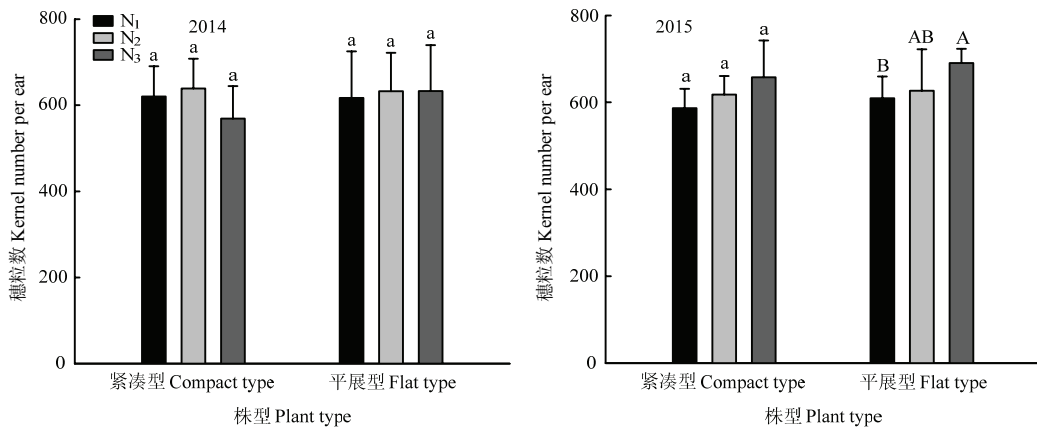


图 6 氮素对不同株型玉米穗粒数的影响
 Fig. 6 Effect of nitrogen on kernel number per ear of different plant type hybrids

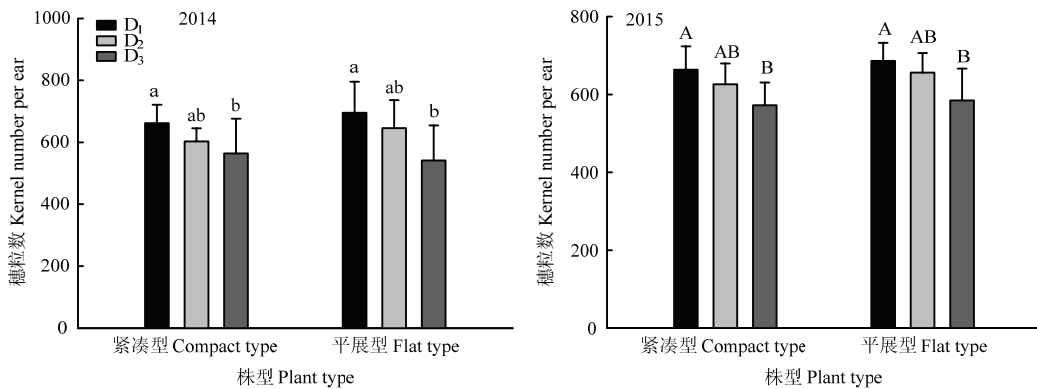


图 7 密度对不同株型玉米穗粒数的影响
 Fig. 7 Effect of density on kernel number per ear of different plant type hybrids

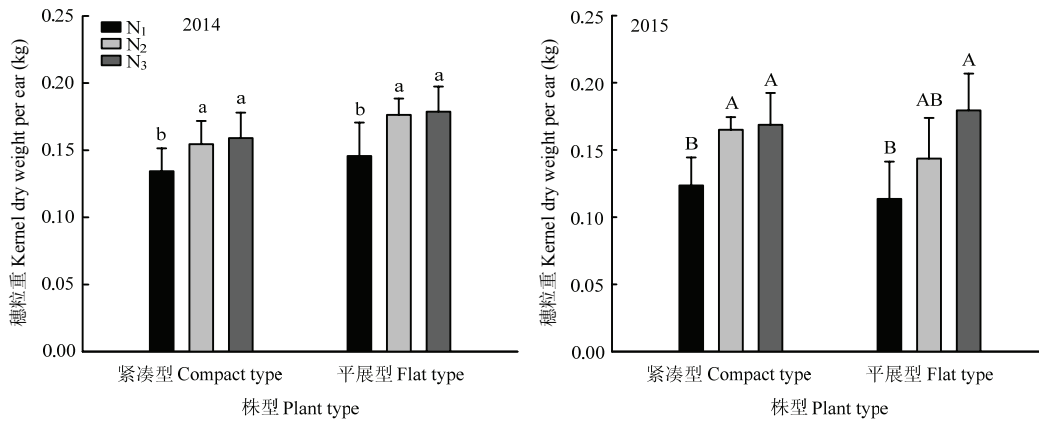


图 8 氮素对不同株型玉米穗粒重的影响

Fig. 8 Effect of nitrogen on kernel dry weight per ear of different plant type hybrids

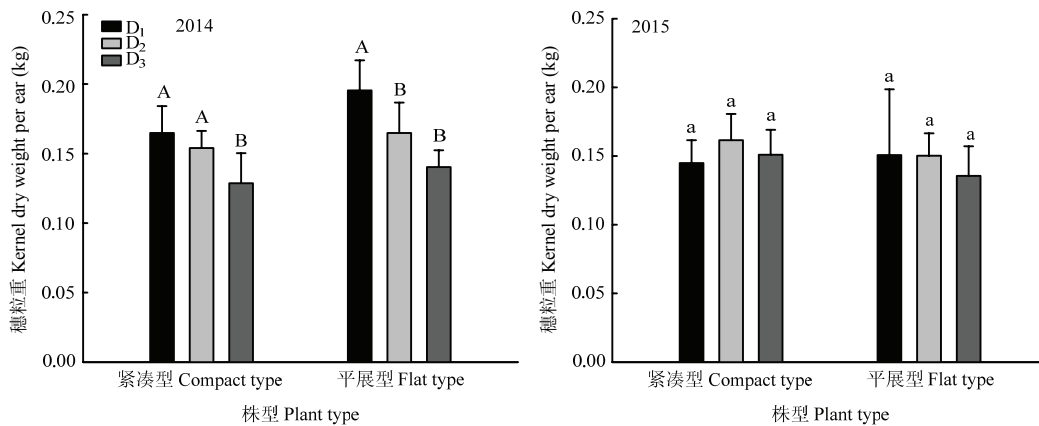


图 9 密度对不同株型玉米穗粒重的影响

Fig. 9 Effect of density on kernel dry weight per ear of different plant type hybrids

对较高值，氮素或密度处理间 HI 差异均不显著（图 10）；在 N₁ 或 D₃ 处理下，平展型玉米 HI 均显著或极显著低于 N₃ 或 D₁ 处理。

2.8 籽粒产量

紧凑型玉米两年平均产量比平展型玉米高 16.9%（表 2）。N₁ 至 N₃ 处理，紧凑型玉米两年产量平均增幅（33.0%）低于平展型玉米（44.2%）；D₁ 至 D₃ 处理，紧凑型玉米两年产量平均变幅（14.5%）高于平展型玉米（11.0%），紧凑型玉米产量在 N₃D₃ 处理表现较高，而平展型玉米产量较高值出现在 N₃D₁ 处理。氮密互作处理下，密度与氮素调控对紧凑型和平展型玉米籽粒产量的贡献比分别为 1 : 2.3 和 1 : 4.0。

3 讨论

3.1 不同株型玉米形态性状对氮密互作的适应性反应

勾玲等^[28]研究指出，耐密品种茎秆基部各节间对密度反应变幅较小，尤其表现在第 4 节间及其以上部位，本研究结果表明，紧凑型玉米增密后第 1—3 节间长度平均降幅均低于同节位平展型玉米，部分验证了勾玲等的研究结果。本研究还发现，紧凑型玉米第 4—5 节间长度由增密引起的降幅明显高于同位平展型玉米由其引起的增幅，说明紧凑型与平展型玉米在茎秆第 4 节间处对增密的响应发生了方向性变化。另外，茎粗和第 1—3 节间长度对施氮/增密“快正/慢负”和“快负/慢负”的响应特点是紧凑型玉米对高肥高密

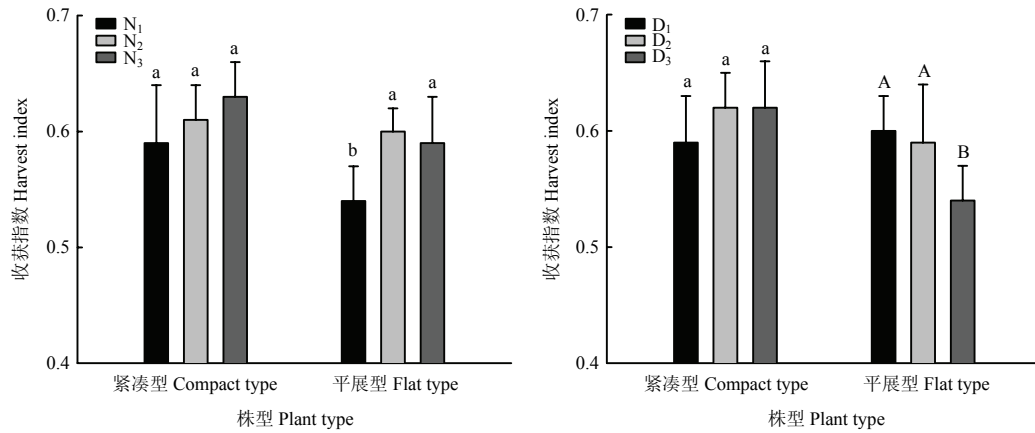


图 10 氮素和密度对不同株型玉米收获指数的影响

Fig. 10 Effect of nitrogen and density on HI of different plant type hybrids

表 2 不同株型品种在氮密互作下的籽粒产量比较

Table 2 Comparison of kernel yield at 14% moisture between two plant type hybrids under nitrogen and density interaction (kg·hm⁻²)

株型 Plant type	品种 Hybrid	年份 Year	氮素 Nitrogen	密度 Density			平均 AVG.
				D ₁	D ₂	D ₃	
紧凑型 Compact type	ZD958	2014	N ₁	8388.8±736.7a	8125.9±1066.0a	8469.3±832.8a	8328.0b
			N ₂	9757.3±972.5a	9641.0±1711.5a	9238.5±1954.3a	9545.6a
			N ₃	9051.5±1241.9b	10654.1±397.8a	10592.1±1120.4a	10099.2a
			平均 VG.	9065.8a	9473.7a	9433.3a	9324.3
		2015	N ₁	6240.1±1216.9b	6652.8±1768.5b	9573.7±135.6a	7488.8b
			N ₂	8439.3±1525.4b	10428.4±1190.1a	10723.6±889.0a	9863.8a
			N ₃	10462.2±557.8a	11025.8±431.1a	11029.0±558.0a	10839.0a
		平均 AVG.	8380.5c	9369.0b	10442.1a	9397.2	
		总计 Total	平均 AVG.	8723.2	9421.3	9937.7	9360.7
		平展型 Flat type	LD120	2014	N ₁	8048.1±2429.6a	6671.0±1310.8a
N ₂	9552.5±1185.8a				9677.9±276.5a	8209.5±932.1a	9146.7a
N ₃	9530.8±65.4a				9624.5±1696.0a	9110.1±1219.6a	9421.8a
平均 AVG.	9043.8a				8657.8a	8029.5a	8577.1
2015	N ₁			5606.6±724.6a	5348.7±665.2a	5907±742.8a	5620.9b
	N ₂			8320.9±1783.0a	7573.7±254.2a	7675.2±464.3a	7856.6a
	N ₃			7384.4±870.1b	9334.0±1304.4a	9730.8±1003.8a	8816.4a
平均 AVG.	7104.0a			7418.8a	7771.1a	7431.3	
总计 Total	平均 AVG.			8073.9	8038.3	7900.3	8004.2

同一品种的氮×密矩阵内部是不同氮素水平下密度处理间的产量显著性差异比较。同年平均值所在的行/列为密度/氮素处理间产量显著性差异比较。小写字母不同表示产量在 0.05 水平上差异显著

Significant difference comparison of yield between 3 densities in the same N×D matrix at 3 nitrogen treatments for one hybrid was showed in Table 2. Means located at each rows or columns in the same N×D matrix at the same year was significant difference comparison of yield between 3 density or 3 nitrogen treatments. Different lowercase means significant at 0.05 level

一种形态适应性表现。张玉芹等^[29]指出,科学的增密和养分管理可协同群体结构和个体功能实现对产量获得的双重挖潜,密度和氮素对玉米植株地上部形态和功能的影响各有侧重^[30-34]。李从锋等^[35]研究表明,与20世纪60和80年代大面积推广应用的玉米杂交种及其亲本相比,当代单交种及其亲本在适当密植条件下茎粗、穗上茎叶夹角和叶向值均有明显改善,株型紧凑的玉米品种中部叶片受光态势好^[36]。本研究发现,紧凑型玉米在氮密互作下通过调节棒三叶叶倾角使植株冠层结构趋于紧凑,降低个体间竞争能量损耗,提高穗位叶光合性能,最终实现群体产量增益,验证了上述研究结论。

3.2 不同株型玉米叶片光合特性对氮密互作的响应

玉米花后碳氮代谢协调、光合作用(特别是中上部叶片^[37])和物质生产能力衰减缓慢对于有效维持较高叶面积指数和光合势,进一步提高作物产量具有重要意义^[38]。适宜的氮肥施用量可使玉米群体光合生理指标达到最佳状态^[9]。本研究结果表明,在氮密互作处理下,适宜的施用氮素(90 kg N·hm⁻²)对灌浆期光合速率的提高具有积极作用;当氮素用量≥90 kg N·hm⁻²时,平展型玉米光合速率降幅明显高于紧凑型玉米。可见,在高氮环境下光合性能高是紧凑型玉米增产的重要生理特性之一。另外,从本研究得出的“与紧凑型玉米相比,平展型玉米穗位叶光合速率随着种植密度的提高(4.5至7.5万株/hm²)降幅较大,且在7.5万株/hm²处理下,紧凑型玉米光合速率均高于平展型玉米”与冯春生等^[39]得出的“在4.5—6.0万株/hm²密度范围内,耐密型玉米单株光合特性与普通型玉米无明显差异”的研究结果不一致,原因可能是试验密度上限设置和选用品种不同。

3.3 氮素与密度对不同株型玉米产量及其构成因素的互作调控

陈传永等^[40]研究认为,耐密玉米品种对不同密度反应迟钝,且具有较高的收获指数,即有较少的生长冗余。本研究结果表明,紧凑型玉米在高密条件下(6.0—7.5万株/hm²)具有较高且差异不显著的收获指数,验证了上述研究结论。增密和施氮主要是通过调控穗粒数或粒重最终影响籽粒产量^[12-13, 24, 40-42]。适当的增加施氮量和提高种植密度,可以显著提高夏玉米的籽粒产量和氮素利用效率^[11]。李明等^[30]研究指出,在密度、氮肥、磷肥和钾肥中,对玉米产量影响最大的是密度,其次是氮肥。本研究结果表明,氮密互作对穗粒重的影响幅度(28.2%)大于穗

粒数(14.9%),且氮素对穗粒重的调控效应大于密度,与李明等研究结论不一致,其原因可能是土壤基础肥力不同。

本研究发现,氮素对籽粒产量的调控作用大于密度。从研究结果中还可以分析出,与平展型玉米相比,紧凑型玉米籽粒产量对增密响应较敏感(紧凑型(14.5%)>平展型(11.0%)),对施氮响应相对较弱(紧凑型(33.0%)<平展型(44.2%)),表明在氮密互作条件下,紧凑型玉米较高的籽粒产量可在较少氮素供应下通过增密来实现,而平展型玉米更擅长于在低密条件下通过增加氮素投入来提高产量。

4 结 论

不同株型玉米形态生理参数对氮素和密度互作调控响应各异,紧凑型玉米在施氮和增密共同作用下能够有效调控茎基部节间纵/横向生长和棒三叶叶倾角,提高穗位叶光合性能,在高密高氮处理下,能够维持较高的物质转化效率最终实现群体增产;而平展型玉米在增密后茎粗下降明显、第1—3节间长度变幅较高,棒三叶叶倾角对施氮响应迟钝,穗位叶叶色值和光合速率对氮量响应峰值低,增密后光合能力低,物质转化效率在高密高氮处理下均较低,最终导致产量损失。

References

- [1] 尹祥佳, 翁建峰, 谢传晓, 郝转芳, 王汉宁, 张世煌, 李新海. 玉米转基因技术研究及其应用. 作物杂志, 2010(6): 1-9.
YIN X J, WENG J F, XIE C Y, HAO Z F, WANG H N, ZHANG S H, LI X H. The maize genetic transformation technology, current status and applications. *Crops*, 2010(6): 1-9. (in Chinese)
- [2] 杨今胜, 王贵, 白娜, 李旭华, 贾春兰, 刘少坤, 柳京国. 我国玉米商业育种与种子产业化初探. 中国农业科技导报, 2013, 15(3): 42-47.
YANG J S, WANG G, BAI N, LI X H, JIA C L, LIU S K, LIU J G. Preliminary studies on corn commercial breeding and seed industrialization in China. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2013, 15(3): 42-47. (in Chinese)
- [3] FAO. <http://faostat3.fao.org>.
- [4] DUVICK D N. The contribution of breeding to yield advances in maize (*Zea mays* L.). *Advances in Agronomy*, 2005, 86(5): 83-145.
- [5] MANN C C. Crop scientists seek a new revolution. *Science*, 1999, 283(5400): 310-314.

- [6] JIM G. Nitrogen study fertilizes fears of pollution. *Nature*, 2005, 433(7028): 791.
- [7] TILMAN D, CASSMAN K G, MATSON P A, NAYLOR R, POLASKY S. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 2002, 418(6898): 671-678.
- [8] 陈志辉, 范连益, 李芳春, 黄虎生. 春玉米密肥调控技术研究. 玉米科学, 1996, 4(4): 57-59.
CHEN Z H, FAN L Y, LI F C, HUANG H S. Research on density and fertilizer regulation of spring maize. *Maize Science*, 1996, 4(4): 57-59. (in Chinese)
- [9] 马国胜, 薛吉全, 路海东, 张仁和, 邵书静, 任建宏. 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, 2008, 28(2): 661-668.
MA G S, XUE J Q, LU H D, ZHANG R H, TAI S J, REN J H. Effects of planting density and nitrogen fertilization on population physiological indexes of summer maize (*Zea mays* L.) in Guanzhong irrigated zone. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 661-668. (in Chinese)
- [10] 曹胜彪, 张吉旺, 杨今胜, 刘伟, 董树亭, 刘鹏, 赵斌. 密度对高产夏玉米产量和氮素利用效率的影响. 玉米科学, 2012, 20(5): 106-110, 120.
CAO S B, ZHANG J W, YANG J S, LIU W, DONG S T, LIU P, ZHAO B. Effects of plant density on grain yield and nitrogen use efficiency of the summer maize with high yield. *Journal of Maize Sciences*, 2012, 20(5): 106-110, 120. (in Chinese)
- [11] 冯尚宗, 王世伟, 彭美祥, 刘宁, 孔金花, 赵理, 赵桂涛. 种植密度和施氮量对高产夏玉米产量、干物质积累及氮素利用效率的影响. 河北农业科学, 2015, 19(3): 18-26, 69.
FENG S Z, WANG S W, PENG M X, LIU N, KONG J H, ZHAO L, ZHAO G T. Effects of planting density and nitrogen rate on grain yield, dry matter accumulation and nitrogen utilization efficiency of high yield summer maize. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2015, 19(3): 18-26, 69. (in Chinese)
- [12] 郭金瑞, 任军, 闫孝贡, 刘建钊, 边秀芝, 刘兆国. 种植密度与施氮水平对春玉米产量形成影响研究. 吉林农业科学, 2015, 40(5): 6-9, 20.
GUO J R, REN J, YAN X G, LIU J Z, BIAN X Z, LIU Z G. Studies on effect of plant density and nitrogen levels on yield formation of spring corn. *Journal of Jilin Agricultural Sciences*, 2015, 40(5): 6-9, 20. (in Chinese)
- [13] 盛耀辉, 王庆祥, 齐华, 王敬亚, 吴亚男. 种植密度和氮肥水平对春玉米产量及氮素效率的影响. 作物杂志, 2010(6): 58-61.
SHENG Y H, WANG Q X, QI H, WANG J Y, WU Y N. Effect of growing density and nitrogen supply on yield and nitrogen use efficiency in spring maize. *Crops*, 2010(6): 58-61. (in Chinese)
- [14] 周江明, 赵琳, 董越勇, 徐进, 边武英, 毛杨仓, 章秀福. 氮肥和栽植密度对水稻产量及氮肥利用率的影响. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2): 274-281.
ZHOU J M, ZHAO L, DONG Y Y, XU J, BIAN W Y, MAO Y C, ZHANG X F. Nitrogen and transplanting density interactions on the rice yield and N use rate. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(2): 274-281. (in Chinese)
- [15] 郭江, 郭新宇, 郭程瑾, 张凤路, 赵春江, 肖凯. 密度对不同株型玉米群体结构的调控效应. 华北农学报, 2008, 23(1): 149-153.
GUO J, GUO X Y, GUO C J, ZHANG F L, ZHAO C J, XIAO K. The effects of density on population structure of maize with different plant types. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2008, 23(1): 149-153. (in Chinese)
- [16] 李国强, 汤亮, 张文宇, 曹卫星, 朱艳. 施氮量对不同株型小麦品种叶型垂直分布特征的影响. 作物学报, 2011, 37(1): 127-137.
LI G Q, TANG L, ZHANG W Y, CAO W X, ZHU Y. Effect of nitrogen rate on vertical distribution characteristics of leaf-type in wheat with different plant types. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(1): 127-137. (in Chinese)
- [17] 徐庆章, 王庆成, 牛玉贞, 王忠孝, 张军. 玉米株型与群体光合作用的关系研究. 作物学报, 1995, 21(4): 492-496.
XU Q Z, WANG Q C, NIU Y Z, WANG Z X, ZHANG J. Studies on relationship between plant type and canopy photosynthesis in maize. *Acta Agronomica Sinica*, 1995, 21(4): 492-496. (in Chinese)
- [18] 郭江, 郭新宇, 王纪华, 张凤路. 不同株型玉米光响应曲线的特征参数研究. 西北植物学报, 2005, 25(8): 1612-1617.
GUO J, GUO X Y, WANG J H, ZHANG F L. Characteristic parameters of light responses of corn varieties with different plant shapes. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2005, 25(8): 1612-1617. (in Chinese)
- [19] 童淑媛, 杜震宇, 徐洪文, 刘胜群, 朱先灿, 宋凤斌. 不同株型玉米叶片净光合速率差异研究. 东北农业大学学报, 2011, 42(4): 42-47.
TONG S Y, DU Z Y, XU H W, LIU S Q, ZHU X C, SONG F B. Study on differences of net photosynthetic rate of leaf in different corn types. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2011, 42(4): 42-47. (in Chinese)
- [20] 胡萌, 魏湜, 杨猛, 矫海波, 魏玲, 王焱, 吉彪. 密度对不同株型玉米光合特性及产量的影响. 玉米科学, 2010, 18(1): 103-107.
HU M, WEI S, YANG M, JIAO H B, WEI L, WANG Y, JI B. Effects of plant density on photosynthetic characters and yield of different

- plant types corn. *Journal of Maize Sciences*, 2010, 18(1): 103-107. (in Chinese)
- [21] 李国强, 汤亮, 张文宇, 曹卫星, 朱艳. 不同株型小麦干物质积累与分配对氮肥响应的动态分析. *作物学报*, 2009, 35(12): 2258-2265.
- LI G Q, TANG L, ZHANG W Y, CAO W X, ZHU Y. Dynamic analysis on response of dry matter accumulation and partitioning to nitrogen fertilizer in wheat cultivars with different plant types. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(12): 2258-2265. (in Chinese)
- [22] 薛吉全, 梁宗锁, 马国胜, 路海东, 任建宏. 玉米不同株型耐密性的群体生理指标研究. *应用生态学报*, 2002, 13(1): 55-59.
- XUE J Q, LIANG Z S, MA G S, LU H D, REN J H. Population physiological indices on density-tolerance of maize in different plant type. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(1): 55-59. (in Chinese)
- [23] 雷恩, 唐启源, 李迪秦, 罗红兵, 陈立军, 詹哈日. 氮素与密度对稻田春玉米产量的影响及相关性研究. *湖南农业科学*, 2009(8): 24-26, 29.
- LEI E, TANG Q Y, LI D T, LUO H B, CHEN L J, ZHAN H R. Effects of nitrogen and density on yield and its relationship of spring maize grown on rice field. *Hunan Agricultural Sciences*, 2009(8): 24-26, 29. (in Chinese)
- [24] 高影. 施氮量和密度对超高产夏玉米碳氮代谢和产量形成的影响[D]. 保定: 河北农业大学, 2014.
- GAO Y. Effects of planting density and nitrogen application rate on carbon and nitrogen metabolism and grain yield of super high-yielding summer maize[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [25] TAN H, ZOU C L, ZHENG D B, HUANG A H, MO R X, WEI X X, WU Y S, JIANG W P, WEI H, HUANG K J. Effect of fertilizing level and planting densities on yield and nitrogen utilization in maize. *Agricultural Science & Technology*, 2015, 16(3): 504-509.
- [26] 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. *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. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(6): 1343-1353. (in Chinese)
- [27] 范霞. 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[D]. 泰安: 山东农业大学, 2014.
- FAN X. Effects of plant density and nitrogen rate on nitrogen uptake and use efficiency of summer maize hybrids with different plant height[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [28] 勾玲, 黄建军, 张宾, 李涛, 孙锐, 赵明. 群体密度对玉米茎秆抗倒力学和农艺性状的影响. *作物学报*, 2007, 33(10): 1688-1695.
- GOU L, HUANG J J, ZHANG B, LI T, SUN R, ZHAO M. Effects of population density on stalk lodging resistant mechanism and agronomic characteristics of maize. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(10): 1688-1695. (in Chinese)
- [29] 张玉芹, 杨恒山, 高聚林, 张瑞富, 王志刚, 徐寿军, 范秀艳, 杨升辉. 超高产春玉米冠层结构及其生理特性. *中国农业科学*, 2011, 44(21): 4367-4376.
- ZHANG Y Q, YANG H S, GAO J L, ZHANG R F, WANG Z G, XU S J, FAN X Y, YANG S H. Study on canopy structure and physiological characteristics of super-high yield spring maize. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(21): 4367-4376. (in Chinese)
- [30] 李明, 李文雄. 肥料和密度对寒地高产玉米源库性状及产量的调节作用. *中国农业科学*, 2004, 37(8): 1130-1137.
- LI M, LI W X. Regulation of fertilizer and density on sink and source traits and yield of maize. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(8): 1130-1137. (in Chinese)
- [31] MA B L, DWYER L M, GREGORICH E G. Soil N amendment, effects on seasonal N mineralization and N cycling in maize production. *Agronomy Journal*, 1999, 91(6): 1003-1009.
- [32] 戴静, 康宇. 氮磷钾配施对玉米主要性状和产量的影响及其施肥规律. *山西农业科学*, 2007, 35(10): 62-64.
- DAI J, KANG Y. Influence of matching phosphate fertilizer with potash fertilizer on corn's main property and output. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2007, 35(10): 62-64. (in Chinese)
- [33] 杨永胜. 供氮水平对玉米生长性状及产量的影响. *河北农业科学*, 2009, 13(6): 42-43.
- YANG Y S. Effects of nitrogen supply on the growth traits and yield of maize. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2009, 13(6): 42-43. (in Chinese)
- [34] 吕丽华, 陶洪斌, 王璞, 刘明, 赵明, 王润正. 种植密度对夏玉米碳氮代谢和氮利用率的影响. *作物学报*, 2008, 34(4): 718-723.
- LÜ L H, TAO H B, WANG P, LIU M, ZHAO M, WANG R Z. Carbon and nitrogen metabolism and nitrogen use efficiency in summer maize under different planting densities. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(4): 718-723. (in Chinese)
- [35] 李从锋, 赵明, 刘鹏, 张吉旺, 杨今胜, 柳京国, 王空军, 董树亭. 中国不同年代玉米单交种及其亲本主要性状演变对密度的响应. *中国农业科学*, 2013, 46(12): 2421-2429.
- LI C F, ZHAO M, LIU P, ZHANG J W, YANG J S, LIU J G, WANG

- K J, DONG S T. Responses of main traits of maize hybrids and their parents to density in different ears of China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(12): 2421-2429. (in Chinese)
- [36] 李登海. 从事紧凑型玉米育种的回顾与展望. 作物杂志, 2000(5): 1-5.
- LI D H. Review and prospect of compact type maize breeding. *Crops*, 2000(5): 1-5. (in Chinese)
- [37] 董树亭, 高荣岐, 胡昌浩, 王群瑛, 王空军. 玉米花粒期群体光合性能与高产潜力研究. 作物学报, 1997, 23(3): 318-325.
- DONG S T, GAO R Q, HU C H, WANG Q Y, WANG K J. Study of canopy photosynthesis property and high yield potential after anthesis in maize. *Acta Agronomic Sinica*, 1997, 23(3): 318-325. (in Chinese)
- [38] 孙雪芳, 丁在松, 侯海鹏, 葛均筑, 唐丽媛, 赵明. 不同春玉米品种花后光合物质生产特点及碳氮含量变化. 作物学报, 2013, 39(7): 1284-1292.
- SUN X F, DING Z S, HOU H P, GE J Z, TANG L Y, ZHAO M. Post-anthesis photosynthetic assimilation and the changes of carbon and nitrogen in different varieties of spring maize. *Acta Agronomic Sinica*, 2013, 39(7): 1284-1292. (in Chinese)
- [39] 冯春生, 尹芝瑞, 赵述文, 李维岳. 耐密型玉米光合速率对产量的关系. 核农学报, 1994, 8(2): 80-86.
- FENG C S, YIN Z R, ZHAO S W, LI W Y. The relationship between photosynthetic rate and yield of densely planting corn. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 1994, 8(2): 80-86. (in Chinese)
- [40] 陈传永, 侯玉虹, 孙锐, 朱平, 董志强, 赵明. 密植对不同玉米品种产量性能的影响及其耐密性分析. 作物学报, 2010, 36(7): 1153-1160.
- CHEN C Y, HOU Y H, SUN R, ZHU P, DONG Z Q, ZHAO M. Effects of planting density on yield performance and density-tolerance analysis for maize hybrids. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36(7): 1153-1160. (in Chinese)
- [41] 杨国虎, 李新, 王承莲, 罗湘宁. 种植密度影响玉米产量及部分产量相关性状的研究. 西北农业学报, 2006, 15(5): 57-60, 64.
- YANG G H, LI X, WANG C L, LUO X N. Study on effects of plant densities on the yield and the related characters of maize hybrids. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2006, 15(5): 57-60, 64. (in Chinese)
- [42] 刘武仁, 郑金玉, 冯艳春, 刘凤成, 罗洋, 刘志全, 沈海波, 王兴家, 张希顺. 玉米品种不同密度下的质量效应. 玉米科学, 2005, 13(2): 99-101.
- LIU W R, ZHENG J Y, FENG Y C, LIU F C, LUO Y, LIU Z Q, SHEN H B, WANG X J, ZHANG X S. The quality effect of different densities of elite maize variety. *Journal of Maize Sciences*, 2005, 13(2): 99-101. (in Chinese)

(责任编辑 杨鑫浩)