中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

播期与密度对鹰嘴豆物质积累运转及产量形成的影响

郝曦煜，梁杰，肖焕玉，王英杰，郭文云，刘婷婷，马信飞

引用本文:
郝曦煜, 梁杰, 肖焕玉, 等. 播期与密度对鹰嘴豆物质积累运转及产量形成的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(10): 1568−1580.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200115

(向下翻页，阅读全文)

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

密度对沿淮晚播小麦产量形成及品质性状的影响

Effect of planting density on yield and quality of later−sown winter wheat along Huaihe River

中国生态农业学报. 2018, 26(9): 1366−1377 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180374

播期、播量和施氮量对小麦干物质积累、转运和分配及产量的影响

Effect of sowing date, planting density, and nitrogen application on dry matter accumulation, transfer, distribution, and yield of wheat

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(3): 375−385 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190691

播期对川中丘区玉米干物质积累与产量的影响

Effect of sowing date on dry matter accumulation and yield of maize in hilly regions of Sichuan Province, China

中国生态农业学报. 2017, 25(2): 221−229 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160631

播期对藜麦农艺性状及产量的影响

Effects of sowing time on agronomic characteristics and yield of quinoa

中国生态农业学报. 2018, 26(5): 643−656 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170852

不同施氮量及种植密度对小麦开花期氮素积累转运的影响

Effects of different nitrogen application amounts and seedling densities on nitrogen accumulation and transport in winter wheat at anthesis stage

中国生态农业学报. 2016(2): 131−141 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.150904

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200115

郝曦煜, 梁杰, 肖焕玉, 王英杰, 郭文云, 刘婷婷, 马信飞. 播期与密度对鹰嘴豆物质积累运转及产量形成的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(10): 1568−1580
HAO X Y, LIANG J, XIAO H Y, WANG Y J, GUO W Y, LIU T T, MA X F. Effect of sowing date and density on matter accumulation and translocation and on yield of chickpeas[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(10): 1568−1580

播期与密度对鹰嘴豆物质积累运转及产量形成的影响*

郝曦煜, 梁 杰**, 肖焕玉, 王英杰, 郭文云, 刘婷婷, 马信飞

(吉林省白城市农业科学院 白城 137000)

摘 要: 为探讨播期、密度及其交互作用对鹰嘴豆物质积累转运及产量形成的影响, 确定适宜东北地区鹰嘴豆种植的播期和密度, 本试验于 2018—2019 年选用‘白鹰 1 号’为试验材料, 设置 4 个播期(3 月 29 日、4 月 7 日、4 月 16 日和 4 月 25 日)和 4 个密度(16.7 万株·hm^{-2}、11.1 万株·hm^{-2}、8.3 万株·hm^{-2} 和 6.7 万株·hm^{-2})处理, 通过测定鹰嘴豆干物质含量、叶面积指数、产量性状以及叶绿素、可溶性糖、粗淀粉和全氮含量, 对不同播期鹰嘴豆的生育进程、光合特性、群体质量、碳氮转运和产量形成进行分析。结果表明, 随着播种期的推迟, 鹰嘴豆的出苗期、开花期、成熟期均推迟, 生育期缩短, 单株荚数先增加后减少。随着生长发育的推进, 不同处理的叶绿素含量和叶面积指数先上升后下降。早播的鹰嘴豆营养器官的干物质积累量低于晚播, 晚播能够提高花后氮素积累量对籽粒氮素的贡献率; 高密度的单株干物质积累量低于低密度, 减小密度能促进可溶性糖转运量及其转运率上升, 同时提高花后氮素积累量。产量与单株荚数呈正相关。播期(X_1)、密度(X_2)与产量(Y)的回归方程为 $Y = -150.288\ 9+47.169\ 3X_1+464.092\ 5X_2-1.499\ 9X_1^2-11.376\ 4X_2^2+1.292\ 2X_1X_2$。综上所述, 中晚播鹰嘴豆的干物质积累量高于中早播。延后播期导致花前可溶性糖积累量和籽粒淀粉含量下降, 而茎、叶的花前贮存氮素转运率和转运量则先上升后下降, 花后氮素积累量对籽粒氮的贡献率上升。中低密度鹰嘴豆的花前物质积累对产量影响较大, 花后氮素积累量较高, 而中高密度鹰嘴豆的花后物质积累对产量影响较大。中早播、中密度或中晚播、高密度的鹰嘴豆可以提高花前贮存氮素转运量对籽粒氮的贡献率。在本试验条件下, ‘白鹰 1 号’选择播期 4 月 23 日、密度 7.64 万株·hm^{-2} 的栽培方式能够获得较高产量。在生产中, 可根据当地地理、气候等环境因素的变化进行调整。

关键词: 鹰嘴豆; 播期; 密度; 产量; 物质转运

中图分类号: S529 开放科学码(资源服务)标识码(OSID):

Effect of sowing date and density on matter accumulation and translocation and on yield of chickpeas*

HAO Xiyu, LIANG Jie**, XIAO Huanyu, WANG Yingjie, GUO Wenyun, LIU Tingting, MA Xinfei

(Baicheng Academy of Agricultural Sciences, Baicheng 137000, China)

* 现代农业产业技术体系(CARS-08-G4)和白城市农业科学院青年发展基金项目(Q2018002)资助

** 通信作者: 梁杰, 主要研究方向为食用豆育种与栽培。E-mail: liangjie9669@163.com
郝曦煜, 主要研究方向为食用豆育种与栽培。E-mail: haoxiyu1990@foxmail.com

收稿日期: 2020-02-20 接受日期: 2020-06-01

* This study was supported by China Agriculture Research System (CARS-08-G4) and the Youth Development Foundation of Baicheng Academy of Agricultural Sciences (Q2018002).

** Corresponding author, E-mail: liangjie9669@163.com

Received Feb. 20, 2020; accepted Jun. 1, 2020

Abstract: This study explores the effect of sowing date and density on matter accumulation and translocation and the yield formation of chickpeas. Determining the optimum sowing date and density for chickpeas planted in Northeast China will lay a foundation for promoting the cultivation of chickpeas and the development of the chickpea industry. Four sowing dates (March 29th, April 7th, April 16th and April 25th) and four sowing densities (16.7×10^4 plants·hm^{-2}, 11.1×10^4 plants·hm^{-2}, 8.3×10^4 plants·hm^{-2} and 6.7×10^4 plants·hm^{-2}) were set during 2018 and 2019. 'Baiying 1' chickpea was as material, and the growth process, photosynthetic characteristics, population quality, carbon and nitrogen translocation, and yield formation of 'Baiying 1'chickpeas during different growth periods were determined through by measuring dry matter content, leaf area index, yield components, and the content of chlorophyll, soluble sugar, starch, and total nitrogen. The date of seedling, flowering, and maturity were delayed as the sowing date was delayed, the growth period was shortened, and pods per plant initially increased, and then decreased. With the growth of chickpeas, the chlorophyll content and leaf area index of different treatments first increased and then decreased. The dry matter accumulation in the vegetative organs of chickpeas planted early was lower than in those planted late. Therefore, later sowing increased the contribution of nitrogen amount accumulated post-anthesis to the grain nitrogen. Further, the dry matter accumulation of chickpeas planted with high density was lower than those planted with low density. Decreased density promoted increased translocation, rate of pre-anthesis assimilation, and nitrogen accumulated post-anthesis. The regression equation of sowing date (X_1), density (X_2), and yield (Y) was $Y=-150.288\ 9+47.169\ 3X_1+464.092\ 5X_2-1.499\ 9X_1^2-11.376\ 4X_2^2+1.292\ 2X_1X_2$. In summary, the dry matter accumulation of chickpeas planted with intermediate and late sowing dates was higher than those with intermediate and early sowing dates. With delayed sowing date, the soluble sugar accumulation and starch content in seeds decreased, and the redistribution amount and efficiency of nitrogen accumulated pre-anthesis stored in stems and leaves first increased and then decreased; however, the contribution of nitrogen accumulated post-anthesis to the grain nitrogent of chickpea increased. The effect of translocation on the yield of pre-anthesis of chickpeas planted with medium and low density was large, and the amount of nitrogen accumulated post-anthesis was high. Moreover, the effect of post-anthesis assimilate accumulation of chickpeas planted with medium and high density on yield was significant. The contribution of redistribution of nitrogen accumulated pre-anthesis to grain nitrogen of chickpeas planted with intermediate and early sowing dates with medium density or intermediate and late sowing dates with high density increased. Under the conditions of this experiment, the optimal cultivation of 'Baiying 1' occurred when sown on April 23th, with a density of 7.64×10^4 plants·hm^{-2}. However, this could vary with differing local geographical, climatic, and other environmental factors.

Keywords: Chickpea; Sowing date; Density; Yield; Matter translocation

鹰嘴豆(*Cicer arietinum* L.), 是野豌豆族(Vicieae)鹰嘴豆属(*Cicer*)的栽培种, 分为 Desi 和 Kabuli 两个亚种[1], 起源于西亚和地中海沿岸, 在印度、土耳其、巴基斯坦等国广泛种植, 是世界上栽培面积较大的食用豆类作物之一[2]。鹰嘴豆富含蛋白质、氨基酸、微量元素和维生素等, 具有较高的营养价值, 同时能起到降血糖、降血脂、降血压等药用作用[3-4]。鹰嘴豆耐旱性较强, 根部能够共生根瘤菌进行生物固氮[5-6], 适宜在我国西北地区、东北地区西部等土壤贫瘠的干旱、半干旱地区种植[7-12]。

不同的播期和密度会给作物带来不同的生态条件, 使生育过程出现差异[13], 对作物的群体环境、群体结构以及产量构成都有很大影响[14]。作物产量不仅取决于单株产量, 还取决于田间群体质量的变化[15]。不同播期能够影响作物个体的生殖生长, 包括花后干物质积累量及其速率等指标的变化, 从而影响群体质量, 使生育进程提前或延迟; 不同密度也通过影响作物个体的营养生长, 包括叶面积指数、花前干物质积累量及其速率等指标的变化, 影响群体质量及群体结构, 通过拓展或紧缩作物的横向生长影响作物产量[14,16-17]。

前人对鹰嘴豆的研究主要集中在资源的评价分析[10,12,18-21], 对营养物质的转运和积累及碳氮转运等方面的研究较少。吾尔古丽·艾麦提[22]通过研究 3 种播期、3 种密度下鹰嘴豆产量和品质的变化发现, 在新疆随着播期的推迟, 鹰嘴豆的全生育期、干物质积累等减少; 随着密度的增加, 单株干物质积累量呈减少趋势, 但单位面积生物产量呈增加趋势, 新疆地区 Desi 型品种适宜播期为 4 月 8—15 日, 适宜密度为 44.5 万株·hm^{-2}。关耀兵等[23]的研究表明密度对产量的影响表现为先上升后下降, 适宜在宁夏南部山区种植鹰嘴豆的密度为 52.5 万株·hm^{-2}。买合木提·艾尼[24]认为产量与种植密度正相关, 随密度的增加, 生物产量增加。Shiferaw 等[25]认为较小的株距可以获得更高的籽粒产量。Machado 等[26]对 2 个鹰嘴豆品种的播期、行距和播种量进行研究, 结果表

明早播可以促进产量的提高, 晚播高密度也可以起到提高产量的作用。虽然前人已对我国西北地区和国外部分产区的鹰嘴豆进行了播期和密度的探讨, 但存在试验处理较少或单独讨论播期或密度等不足, 且未对鹰嘴豆植株变化较快的生殖生长阶段进行不同时期的叶绿素含量、叶面积指数、干物质变化及碳氮转运的研究。确定适宜的播期和密度能够提高鹰嘴豆的产量和品质, 但需要根据种植地区的不同进行调整以达到最佳效果[26-28]。为了探索鹰嘴豆东北地区的播期和密度, 同时补充不同处理对干物质变化及碳氮转运等方面的影响分析, 本试验通过选择广适、高产的鹰嘴豆品种作为试验材料, 以期通过设置更多的播期和密度处理, 对不同生长时期鹰嘴豆的群体质量、碳氮转运和产量形成进行分析, 进一步探讨播期、密度及其互作对鹰嘴豆产量形成的影响, 确定适宜东北地区鹰嘴豆种植的播期和密度, 为鹰嘴豆的推广种植和产业发展奠定基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料与试验地点

试验材料采用吉林省白城市农业科学院选育的鹰嘴豆品种'白鹰 1 号'(Kabuli)。该品种适宜半干旱地区种植。试验地点设于吉林省白城市农业科学院试验地(45°38′N, 122°50′E, 海拔 155.4 m)。生育期内年平均气温 18.7 ℃, 年均降水量 316 mm, 年均日照时数 1 552.1 h。试验地为淡黑钙土, 地势平整, 土壤肥力相同, 耕层土壤(0~20 cm)含有机质 21.5 g·kg^{-1}, 全氮 1.9 g·kg^{-1}, 全磷 1.4 g·kg^{-1}, 全钾 1.7 g·kg^{-1}, 碱解氮 119.7 mg·kg^{-1}, 有效磷 86.3 mg·kg^{-1}, 速效钾 134.2 mg·kg^{-1}, 土壤 pH 7.3。两年试验前茬分别为高粱 [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]、小豆 (*Vigna angularis* L.)。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计

本试验于 2018—2019 年进行。试验以播期为主处理, 设置 3 月 29 日(D1)、4 月 7 日(D2)、4 月 16 日(D3)、4 月 25 日(D4)4 个播种期; 种植行距 60 cm, 株距为副处理, 设置 10 cm(M1)、15 cm(M2)、20 cm(M3)和 25 cm(M4)4 个处理, 分别对应 16.7 万株·hm^{-2}、11.1 万株·hm^{-2}、8.3 万株·hm^{-2}、6.7 万株·hm^{-2} 4 个密度。试验小区面积 12 m^2, 随机排列, 3 个重复, 共 48 小区。

以试验小区内 50%的植株出现花蕾的日期为现蕾期, 50%的植株见花的日期为开花期, 70%以上的荚呈成熟色的日期为成熟期[29]。在现蕾期分别取长势一致的植株 20 株, 开花期在各处理选择同一日开花的植株 10 株挂牌标记。成熟期每小区收获 6 m^2, 脱粒晒干用于生物产量、经济产量以及品质的测定。

2018 年 4—7 月生育期间平均温度 19.0 ℃, 降水量 328.9 mm, 日照 989.47 h; 2019 年 4—7 月生育期间平均温度 18.3 ℃, 降水量 198.8 mm, 日照 1 083.5 h。

1.2.2 测定项目与方法

1)干物质: 在开花后 0 d、10 d、20 d 和成熟期分别取挂牌的植株 3 株, 置于 105 ℃下杀青 30 min, 70 ℃烘干至恒重作为干样, 用来测定可溶性糖、蛋白质及干物质含量。

2)叶绿素: 在现蕾期选定的长势一致的植株中选取 3 株分别于开花前 10 d、开花后 0 d、10 d、20 d、30 d 使用叶绿素仪(KONICA MINOLTA SPAD-502 Plus)测量不同生育时期叶片叶绿素含量。

3)叶面积指数(LAI): 选取测定叶绿素的相同植株使用叶面积仪(托普 YMJ-D)测量不同生育时期单位面积土地上的叶面积。

4)产量性状: 成熟期每小区取 5 株调查株高、单株荚数、单荚粒数, 成熟籽粒风干后测量产量、百粒重, 调查及考种方法参照《鹰嘴豆种质资源描述规范和数据标准》[29]。部分指标测量方法参考孙中伟的方法[30]。

5)可溶性糖含量采用蒽酮法测定[31]; 粗淀粉含量采用旋光法测定[31]; 全氮含量采用凯氏定氮法测定[31]。

6)干物质积累与转运特征参数(根、茎、叶)指标计算如下:

花前同化物转运量(TAA, kg·hm^{-2})=各营养器官花前干重–各营养器官成熟期干重 (1)

花前同化物转运率(TAR, %)=花前同化物转运量/各营养器官花前干重×100 (2)

花前同化物对籽粒产量的贡献率(CTA, %)=花前同化物转运量/成熟期籽粒干重×100 (3)

花后同化物积累量(PAA, kg·hm^{-2})=成熟期籽粒干重–花前同化物转运量 (4)

花后同化物积累量对籽粒产量的贡献率(CPA, %)=花后同化物积累量/成熟期籽粒干重×100 (5)

7)营养器官花前贮存可溶性糖输出量和对淀粉贡献率的计算(假设营养器官中所有的损失都转移到籽粒淀粉中去, 而且不计呼吸消耗、淋溶和营养器官间的再分配):

可溶性糖转运量(SRQ, g·plant^{-1})=开花期可溶性糖积累量–成熟期植株器官可溶性糖积累量 (6)

可溶性糖转运率(SRR, %)=花前可溶性糖转运量/开花期植株器官可溶性糖总积累量×100　(7)

可溶性糖转运量对籽粒淀粉的贡献率(PSGS, %)=花前可溶性糖转运量/成熟期籽粒淀粉产量×100　(8)

8)氮素积累与转运特征参数(假设营养器官中所有氮素的损失都转移到籽粒中去, 而且不计呼吸消耗、淋溶和营养器官间的再分配):

花前贮存氮转运量(RANP, kg·hm^{-2})=各营养器官开花期氮积累量–各营养器官成熟期氮积累量　(9)

花前贮存氮转运率(RENP, %)=花前贮存氮转运量/各营养器官开花期氮积累　(10)

花前贮存氮素转运量对籽粒氮的贡献率(CRNP, %)=花前贮存氮转运量/成熟期籽粒氮积累量×100　(11)

花后氮积累量(NAP, kg·hm^{-2})=成熟期籽粒氮积累量–花前贮存氮转运量　(12)

花后氮积累量对籽粒氮的贡献率(CNP, %)=花后氮积累量/成熟期籽粒氮积累量×100　(13)

1.3　数据整理与分析

使用 Microsoft Excel 2019 进行数据整理, SPSS 22.0 进行统计分析, LSD 法进行多重比较, Excel 2019 和 Design Expert 8.0 作图。

2　结果与分析

2.1　播期与密度对鹰嘴豆群体质量的影响

2.1.1　对鹰嘴豆生育进程的影响

由表 1 可知, 播期对鹰嘴豆的生育进程影响显著。随着播种期的推迟, 出苗期、开花期、成熟期均推迟, 且不同密度间趋势相同。从播种期到出苗期的日数表现为 D1>D2>D3=D4, 同一播期下 M2 的出苗日数较小; 从出苗期到开花期的日数表现为 D4>D3>D2>D1, 同一播期下 M2 的苗期到开花期的日数较少; 从开花期到成熟期的日数表现为 D3>D4>D1>D2, 同一播期下 M3 的日数较少。

播期对鹰嘴豆的生育期天数影响主要表现为 D1>D2>D3>D4, 同一播期中 M1 的生育期天数较少。这表明播种期的提前虽然提前了鹰嘴豆的成熟期, 但就整个生育期而言, 播种期越早, 生育期越长。

2.1.2　对鹰嘴豆叶绿素含量的影响

除 D2 播期各密度鹰嘴豆叶绿素含量最大值间不存在显著差异外, 其他播期 M1 密度鹰嘴豆叶绿素含量最大值均显著高于 M4, D4 播期 M2 密度叶绿素含量最大值也显著高于 M4。各处理鹰嘴豆叶绿素含量均随着生长发育的推进表现出先上升后下降的趋势(图 1)。其中, D1、D2、D3 播期叶绿素含量最

表 1　播期与密度对鹰嘴豆生育进程的影响

Table 1　Effect of sowing date and density on growing period of chickpea

播期 Sowing date	密度 Density	出苗期(月-日) Seedling date (month-day)	开花期(月-日) Flowering date (month-day)	成熟期(月-日) Maturity date (month-day)	生育期天数 Growth duration (d)
D1	M1	04-30	06-09	07-16	110a
	M2	04-29	06-09	07-16	110a
	M3	04-30	06-09	07-16	110a
	M4	04-30	06-09	07-16	110a
D2	M1	05-02	06-10	07-16	104abc
	M2	04-29	06-10	07-18	105ab
	M3	04-30	06-10	07-16	104abc
	M4	04-30	06-11	07-16	104abc
D3	M1	05-02	06-13	07-24	99bc
	M2	05-02	06-13	07-27	101bc
	M3	05-02	06-13	07-27	101bc
	M4	05-02	06-14	07-27	101bc
D4	M1	05-08	06-20	07-29	97c
	M2	05-08	06-20	07-29	97c
	M3	05-08	06-22	07-29	97c
	M4	05-08	06-24	08-01	100bc

D1、D2、D3 和 D4 分别表示播期为 3 月 29 日、4 月 7 日、4 月 16 日和 4 月 25 日; M1、M2、M3 和 M4 分别表示密度为 16.7 万株·hm^{-2}、11.1 万株·hm^{-2}、8.3 万株·hm^{-2} 和 6.7 万株·hm^{-2}。生育期天数列不同小写字母表示不同处理在 P<0.05 水平差异显著。D1, D2, D3 and D4 are sowing dates of Mar. 29, Apr. 7, 16 and 25, respectively. M1, M2, M3 and M4 indicate densities of 16.7×10^4 plants·hm^{-2}, 11.1×10^4 plants·hm^{-2}, 8.3×10^4 plants·hm^{-2} and 6.7×10^4 plants·hm^{-2}, respectively. Different lowercase letters in the growth duration column mean significant differences among different treatments at P<0.05 level.

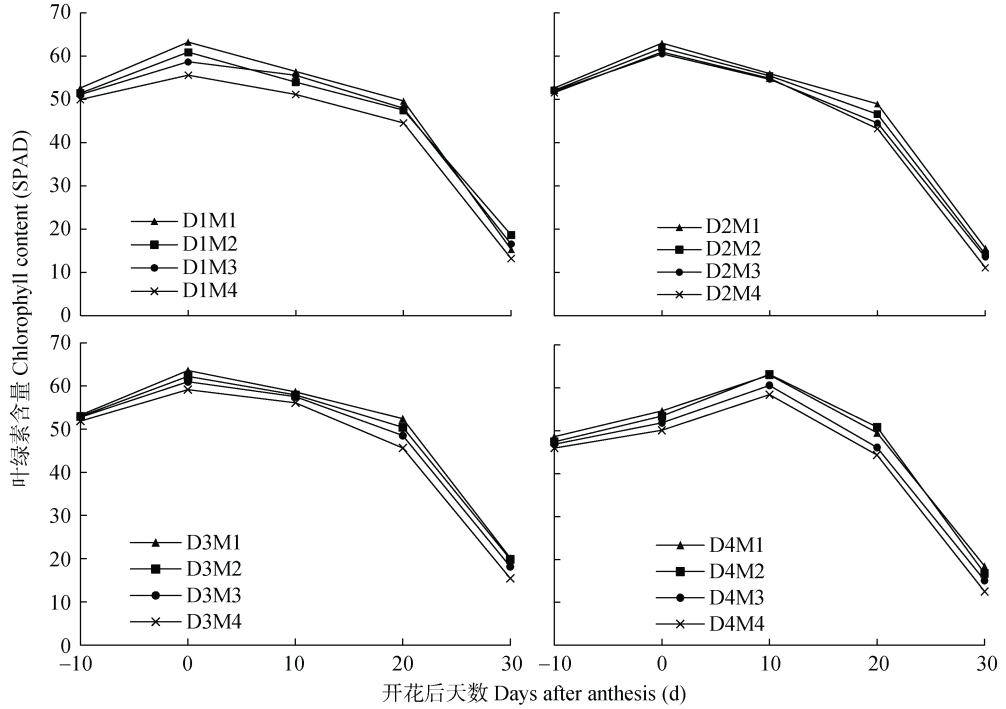

图 1 播期与密度对鹰嘴豆叶绿素含量的影响

Fig. 1 Effect of sowing date and density on chlorophyll content of chickpea

D1、D2、D3 和 D4 分别表示播期为 3 月 29 日、4 月 7 日、4 月 16 日和 4 月 25 日; M1、M2、M3 和 M4 分别表示 16.7 万株·hm^{-2}、11.1 万株·hm^{-2}、8.3 万株·hm^{-2} 和 6.7 万株·hm^{-2}。D1, D2, D3 and D4 are sowing dates of Mar. 29, Apr. 7, 16 and 25, respectively. M1, M2, M3 and M4 indicate densities of 16.7×10^4 plants·hm^{-2}, 11.1×10^4 plants·hm^{-2}, 8.3×10^4 plants·hm^{-2} and 6.7×10^4 plants·hm^{-2}, respectively.

大值均出现在开花期, D4 播期叶绿素含量最大值出现在开花后 10 d。D1、D2、D3 播期中, M1 密度叶绿素含量最大值均高于其他密度, 而 D4 播期中叶绿素含量最大的处理为 M2 密度。

D1 播期中, 叶绿素含量最大值由大到小为 M1(63.23 SPAD)>M2>M3>M4; D2 播期中, M1 (63.02 SPAD)>M2>M4>M3; D3 播期中, M1(63.56 SPAD)>M2>M3>M4; D4 播期中, M2(63.13 SPAD)> M1>M3>M4。

2.1.3 对鹰嘴豆叶面积指数的影响

由图 2 可知, 播期和密度的变化对鹰嘴豆的 LAI 影响显著。随着播期的延后, 开花期后 LAI 上升幅度加大; 同一播期下播种密度越大, LAI 越大, 且 M1 密度下 LAI 最大值显著高于 M3、M4。各处理间均表现为先升高后下降的趋势, 开花期前各处理 LAI 上升较慢; 开花期后 LAI 迅速升高, 在开花后 20 d 达最大值, 随后迅速下降。D1、D2、D3 和 D4 播期鹰嘴豆 LAI 最大值分别为 4.21、4.03、4.62、4.33。

2.1.4 对鹰嘴豆干物质积累及转运的影响

由图 3 可知, 不同播期不同密度鹰嘴豆干物质积累量的变化趋势相似, M3 的干物质积累量显著高于其他密度。干物质在开花后 10~20 d 积累较快, 随后增长趋于平缓, 开花后 30 d 时达最大值。随着播期的延后, 各处理的干物质最大积累量呈现出先升高后降低的趋势, 表现为 D3>D4>D2>D1。同一播期下不同生长时期干物质积累量均表现为 M3>M4> M2>M1。

播期、密度、播期×密度对鹰嘴豆花前同化物转运量(TAA)、花前同化物转运率(TAR)、花前同化物对籽粒产量的贡献率(CTA)、花后同化物积累量(PAA)和花后同化物积累量对籽粒产量的贡献率(CPA)的影响均表现差异显著(表 2)。TAA 在 D3 播期 M2 密度下达最大值(2 249.48 kg·hm^{-2}), D1、D2、D4 播期中 TAA 最大值分别出现在 M4、M3、M2 密度。D3 播期 M2 密度的 TAR 最大(30.79%), D1、D2、D4 播期中 TAR 最大值分别出现在 M1、M3、M2 密度。CTA 的最大值出现在 D3 播期 M2 密度(43.56%), D1、D2、D4 播期中 CTA 的最大值分别为 M1、M2、M2。不同播期的 PAA 最大值均出现在 M3 密度, 表明 M3 密度更适宜开花期后同化物积累。D3 播期 M3 密度的 CPA 最大(73.88%), 其次为 D2 播期 M4 和 M1 密度、D4 播期 M1 密度。

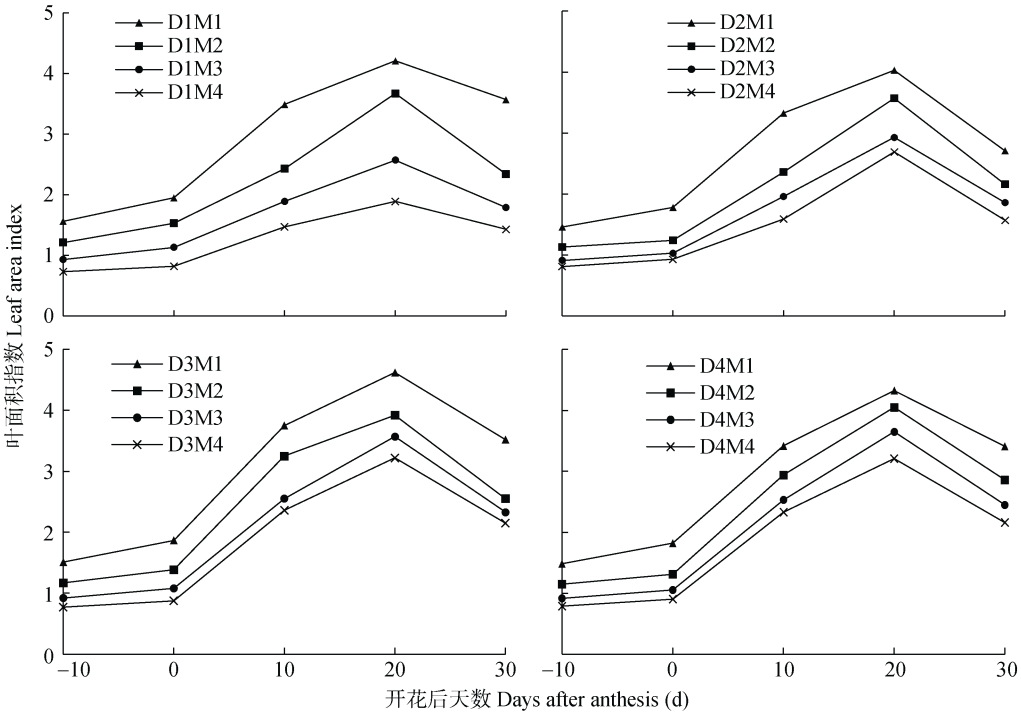

图 2　播期与密度对鹰嘴豆叶面积指数的影响

Fig. 2　Effect of sowing date and density on leaf area index of chickpea

D1、D2、D3 和 D4 分别表示播期为 3 月 29 日、4 月 7 日、4 月 16 日和 4 月 25 日; M1、M2、M3 和 M4 分别表示 16.7 万株·hm^{-2}、11.1 万株·hm^{-2}、8.3 万株·hm^{-2} 和 6.7 万株·hm^{-2}。D1, D2, D3 and D4 are sowing dates of Mar. 29, Apr. 7, 16 and 25, respectively. M1, M2, M3 and M4 indicate densities of 16.7×10^4 plants·hm^{-2}, 11.1×10^4 plants·hm^{-2}, 8.3×10^4 plants·hm^{-2} and 6.7×10^4 plants·hm^{-2}, respectively.

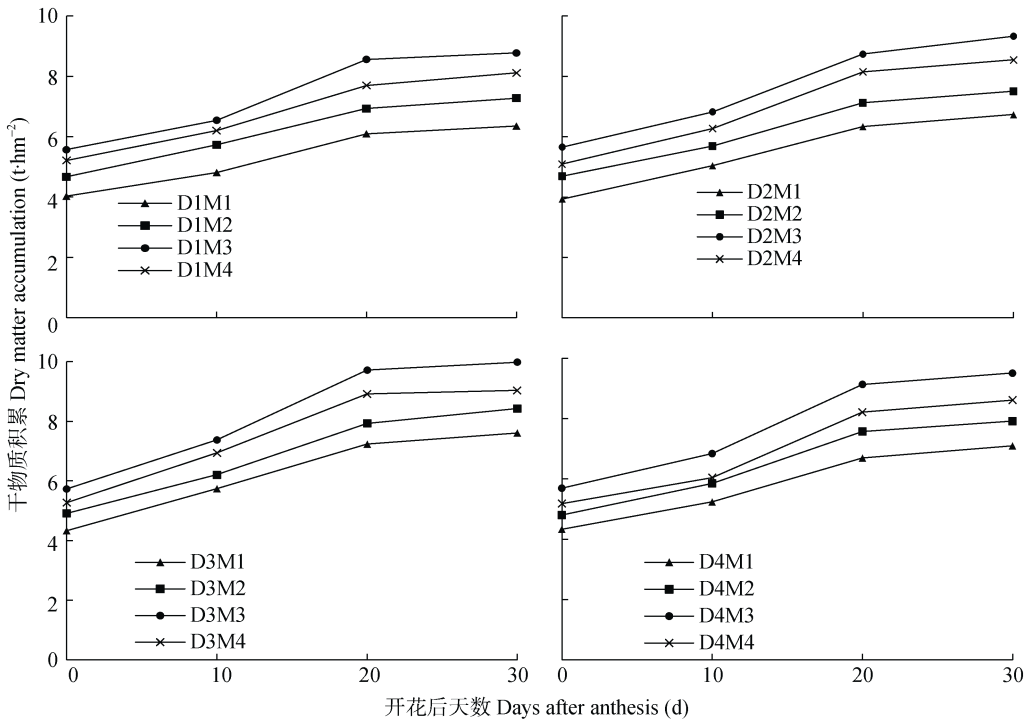

图 3　播期与密度对鹰嘴豆干物质积累的影响

Fig. 3　Effect of sowing date and density on dry matter accumulation of chickpea

D1、D2、D3 和 D4 分别表示播期为 3 月 29 日、4 月 7 日、4 月 16 日和 4 月 25 日; M1、M2、M3 和 M4 分别表示 16.7 万株·hm^{-2}、11.1 万株·hm^{-2}、8.3 万株·hm^{-2} 和 6.7 万株·hm^{-2}。D1, D2, D3 and D4 are sowing dates of Mar. 29, Apr. 7, 16 and 25, respectively. M1, M2, M3 and M4 indicate densities of 16.7×10^4 plants·hm^{-2}, 11.1×10^4 plants·hm^{-2}, 8.3×10^4 plants·hm^{-2} and 6.7×10^4 plants·hm^{-2}, respectively.

表 2 播期与密度对鹰嘴豆干物质转运的影响

Table 2 Effect of sowing date and density on dry matter remobilization of chickpea

播期(月-日) Sowing date (month-day)	密度 Density ($\times10^4$ plants·hm^{-2})	TAA (kg·hm^{-2})	TAR (%)	CTA (%)	PAA (kg·hm^{-2})	CPA (%)
03-29 (D1)	16.7 (M1)	1 391.47de	19.51b	37.47d	2 322.42g	62.53g
	11.1(M2)	1 244.02e	11.62de	32.34ef	2 603.20fg	67.66e
	8.3 (M3)	1 366.48de	9.52ef	29.88f	3 206.30de	70.12e
	6.7 (M4)	1 635.87c	16.38bc	36.02d	2 905.80ef	63.98g
04-07 (D2)	16.7 (M1)	1 018.72f	10.91e	26.65g	2 803.50efg	73.35d
	11.1(M2)	1 390.75de	14.64cd	33.07e	2 814.81efg	66.93f
	8.3 (M3)	1 712.22c	15.29c	31.77ef	3 676.67cd	68.23ef
	6.7 (M4)	1 235.22e	9.25ef	26.33g	3 456.45cd	73.67d
04-16 (D3)	16.7 (M1)	1 270.20b	14.32a	32.97b	2 582.58h	67.03i
	11.1(M2)	2 249.48de	30.79b	43.56g	2 914.41bc	56.44d
	8.3 (M3)	1 500.98d	11.18e	26.12gh	4 246.24a	73.88cd
	6.7 (M4)	1 622.63f	15.77f	30.68i	3 666.26ab	69.32b
04-25 (D4)	16.7 (M1)	1 039.42a	8.99a	27.33a	2 763.36h	72.67j
	11.1(M2)	1 860.89b	23.75a	37.40c	3 114.11efg	62.60h
	8.3 (M3)	1 748.08e	15.70ef	31.42h	3 815.81ab	68.58c
	6.7 (M4)	1 774.58g	19.24g	34.13j	3 425.42a	65.87a
F 值 *F*-value	D	22.17**	9.29**	27.65**	14.74**	27.65**
	M	108.93**	96.98**	423.43**	100.18**	423.43**
	D×M	105.67**	32.32**	155.54**	13.09**	155.54**

TAA: 花前同化物转运量; TAR: 花前同化物转运率; CTA: 花前同化物对籽粒产量的贡献率; PAA: 花后同化物积累量; CPA: 花后同化物积累量对籽粒产量的贡献率。同列不同小写字母表示不同处理(播期×密度)在 $P<0.05$ 水平差异显著, **表示在 $P<0.01$ 水平差异显著。TAA: translocation amount of pre-anthesis; TAR: translocation rate of pre-anthesis assimilate; CTA: contribution of pre-anthesis translocated assimilate to grain yield; PAA: post-anthesis assimilate accumulation; CPA: contribution of post-anthesis assimilate to grain yield. Different lowercase letters in the same column mean significant differences among different treatments of sowing date and density at $P<0.05$ levels. ** means significant differences at $P<0.01$ level.

2.2 不同播期与密度对鹰嘴豆碳氮转运的影响

2.2.1 对鹰嘴豆碳代谢的影响

由表 3 可知, 不同播期不同密度鹰嘴豆茎的可溶性糖转运量(SRQ)、可溶性糖转运率(SRR)和可溶性糖转运量对籽粒淀粉含量的贡献率(PSGS)均高于叶。播期对茎、叶的 SRQ 和 SRR 影响显著; 密度对叶的 SRQ、PSGS 和茎的 SRQ 影响显著; 播期×密度对鹰嘴豆茎和叶的 SRQ、SRR、PSGS 的影响均不显著。随着播期的延后, 茎、叶的 SRQ 下降, 而茎的 SRR 略有上升, 茎的 PSGS 没有显著差异, 叶的 PSGS 略有上升, D2、D3、D4 播期 M3、M4 密度茎、叶的 SRQ 均高于 M1、M2, 同时 M3、M4 叶的 PSGS 均高于 M1、M2。随着密度的减小, D1、D3 的茎和叶的 SRQ 先上升后下降, D2、D4 茎和叶的 SRQ 持续上升。

2.2.2 对鹰嘴豆氮代谢的影响

不同播期不同密度下鹰嘴豆茎的花前贮存氮转运量(RANP)和花前贮存氮转运率(RENP)均高于叶(表 4)。播期、密度及其交互作用分别对茎、叶的 RANP、RENP 产生显著影响。随着播期的延后, M1 处理茎、叶的 RANP 逐渐上升, M2、M3、M4 处理茎、叶的 RANP 表现为先上升后略有下降, 在 D3 播期出现最大值; 茎、叶的 RENP 整体表现为先上升后下降。随着密度的下降, 茎、叶的 RANP 也表现为先上升后下降。

由表 5 可知, 播期、密度对 RANP、RENP、花前贮存氮转运量对籽粒氮的贡献率(CRNP)、花后氮积累量(NAP)、花后氮积累量对籽粒氮的贡献率(CNP)影响显著, 播期×密度对 RENP、CRNP、CNP、NAP 影响显著; 随着播期的延后, RANP 先升高后下降, RANP 在各播期 M3 处理下达最大值。RENP 在 D3 播期 M2 处理达最大值(79.09%), D1、D2、D4 播期的最大值分别出现在 M1、M3、M2 处理。随着播期的延后, 各密度的 CRNP 最大值表现为先下降后上升, D1 播期 M3 密度的 CRNP 最大(73.62%), D2、D3、D4 播期的最大值出现在 M2、M1、M1 处理。各播期 NAP 的最大值分别出现在 M4、M3、M2、M3 处理, 其中 D3 播期 M2 密度的 NAP 最大(67.88 kg·hm^{-2})。CNP 在 D3 播期 M2 密度下达最大值(34.85%), D1、D2、D4 播期下 CNP 最大值分别出现在 M1、M3、M2 处理。

表 3　播期与密度对鹰嘴豆花前营养器官贮存可溶性糖转运的影响

Table 3　Effect of sowing date and density on redistribution of pre-anthesis soluble sugar stored in chickpea vegetative organs

播期(月-日) Sowing date (month-day)	密度 Density ($\times10^4$ plants·hm^{-2})	茎 Stem			叶 Leaf		
		SRQ (g·plant^{-1})	SRR (%)	PSGS (%)	SRQ (g·plant^{-1})	SRR (%)	PSGS (%)
03-29 (D1)	16.7 (M1)	1.86ab	91.40b	16.21a	0.11abcd	75.24a	1.92bc
	11.1(M2)	1.66abc	93.10a	15.91a	0.11ab	74.98a	3.16ab
	8.3 (M3)	2.17a	93.65a	15.78a	0.15a	75.57a	3.26a
	6.7 (M4)	1.71abc	94.40a	15.89a	0.11abc	72.42b	2.95abc
04-07 (D2)	16.7 (M1)	0.90cde	93.05a	15.68a	0.06def	74.59a	2.92bc
	11.1(M2)	1.43abcde	94.58a	16.22a	0.08bcdef	74.86a	2.72c
	8.3 (M3)	1.46abcde	94.19a	15.77a	0.10bcde	75.15a	3.18ab
	6.7 (M4)	1.73abc	93.18a	15.84a	0.11ab	75.99a	3.03ab
04-16 (D3)	16.7 (M1)	0.66e	94.29a	15.65a	0.04f	75.32a	2.97abc
	11.1(M2)	0.80de	94.93a	15.78a	0.05ef	74.86a	2.96abc
	8.3 (M3)	1.66abc	94.38a	16.31a	0.11ab	75.58a	3.23ab
	6.7 (M4)	1.54abcd	94.07a	16.11a	0.10bcde	75.22a	3.05abc
04-25 (D4)	16.7 (M1)	0.75de	94.59a	16.06a	0.05f	74.86a	2.90abc
	11.1(M2)	0.94cde	94.42a	15.94a	0.06cdef	74.76a	3.03abc
	8.3 (M3)	1.09bcde	94.41a	15.83a	0.07bcdef	75.56a	3.22ab
	6.7 (M4)	1.58abcd	94.49a	15.97a	0.10abcd	75.28a	3.14ab
F 值 *F*-value	D	7.54**	3.98*	0.20	8.69**	3.03*	0.97
	M	5.52*	2.50	0.13	9.03**	2.53	6.70**
	D×M	1.13	1.84	0.98	1.18	3.66	1.16

SRQ: 可溶性糖转运量; SRR: 可溶性糖转运率; PSGS: 可溶性糖转运量对籽粒淀粉的贡献率。表中同列不同小写字母表示不同处理(播期×密度)在 $P<0.05$ 水平差异显著。*和**表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平差异显著。SRQ: soluble sugar redistribution quantity; SRR: soluble sugar redistribution rate; PSGS: contribution of SRQ to grain starch. Different lowercase letters in the same column mean significant differences among different treatments of sowing date and density at $P<0.05$ level. * and ** mean significant differences at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively.

表 4　播期与密度对鹰嘴豆花前营养器官贮存氮转运的影响

Table 4　Effect of sowing date and density on redistribution of pre-anthesis nitrogen stored in chickpea vegetative organs

播期(月-日) Sowing date (month-day)	密度 Density ($\times10^4$ plants·hm^{-2})	茎 Stem		叶 Leaf	
		RANP (kg·hm^{-2})	RENP (%)	RANP (kg·hm^{-2})	RENP (%)
03-29 (D1)	16.7 (M1)	85.86h	75.07cde	11.13f	70.08cde
	11.1(M2)	93.93gh	71.73fg	12.02f	66.07fg
	8.3 (M3)	112.60cdef	71.25g	14.38cde	65.50g
	6.7 (M4)	107.50ef	73.56defg	13.86de	68.28defg
04-07 (D2)	16.7 (M1)	89.78gh	74.05cdef	11.59f	68.86cdef
	11.1(M2)	99.47fg	73.61defg	12.83ef	68.33defg
	8.3 (M3)	125.38abc	74.65cde	16.23abc	69.58cde
	6.7 (M4)	112.23cdef	72.93efg	14.43cde	67.51efg
04-16 (D3)	16.7 (M1)	91.40gh	73.43defg	11.78f	68.12defg
	11.1(M2)	112.13cdef	79.58a	14.77cd	75.50a
	8.3 (M3)	133.93a	74.55cde	17.33a	69.46cde
	6.7 (M4)	121.48abcd	75.50cd	15.78abc	70.60cd
04-25 (D4)	16.7 (M1)	92.16gh	72.16fg	11.81f	66.59fg
	11.1(M2)	110.73def	77.70ab	14.50cde	73.24ab
	8.3 (M3)	128.56ab	75.11cde	16.67ab	70.13cde
	6.7 (M4)	118.14bcde	76.24bc	15.39bcd	71.49cb
F 值 *F*-value	D	10.12**	12.98**	10.37**	13.24**
	M	53.49**	5.79**	46.22**	5.83**
	D×M	0.65	8.09**	0.81	8.12**

RANP: 花前贮存氮转运量; RENP: 花前贮存氮转运率。同列不同小写字母表示不同处理(播期×密度)在 $P<0.05$ 水平差异显著。*和**表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平差异显著。RANP: redistribution amount of nitrogen accumulated pre-anthesis; RENP: redistribution rate of nitrogen accumulated pre-anthesis. Different lowercase letters in the same column mean significant differences among different treatments of sowing date and density at $P<0.05$ level. * and ** mean significant differences at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively.

表 5 播期与密度对鹰嘴豆花前贮存氮再转运和花后氮积累的影响

Table 5 Effect of sowing date and density on redistribution of pre-anthesis stored and post-anthesis accumulated nitrogen in chickpea

播期(月-日) Sowing date (month-day)	密度 Density ($\times10^4$ plants·hm^{-2})	RANP (kg·hm^{-2})	RENP (%)	CRNP (%)	NAP (kg·hm^{-2})	CNP (%)
03-29 (D1)	16.7 (M1)	96.99h	74.46cde	69.24def	43.09c	30.76cde
	11.1(M2)	105.95gh	71.04fg	73.01ab	39.16c	26.99gh
	8.3 (M3)	126.98cdef	70.55g	73.62a	45.50c	26.38h
	6.7 (M4)	121.36ef	72.92defg	70.84bcde	49.95bc	29.16defg
04-07 (D2)	16.7 (M1)	101.37gh	73.41cdef	70.31cdef	42.80c	29.69cdef
	11.1(M2)	112.30fg	72.97defg	70.79bcde	46.33c	29.21defg
	8.3 (M3)	141.61abc	74.04cde	69.67def	61.66ab	30.33cde
	6.7 (M4)	126.66cdef	72.27efg	71.57abcd	50.31bc	28.43efgh
04-16 (D3)	16.7 (M1)	103.17gh	72.78defg	70.99bcde	42.15c	29.01defg
	11.1(M2)	126.90cdef	79.09a	65.15h	67.88a	34.85a
	8.3 (M3)	151.26a	73.93cde	69.77def	65.52a	30.23cde
	6.7 (M4)	137.26abcd	74.90cd	68.81efg	62.23ab	31.19bcd
04-25 (D4)	16.7 (M1)	103.97gh	71.48fg	72.48abc	39.47c	27.52fgh
	11.1(M2)	125.23def	77.16ab	66.73gh	62.42ab	33.27ab
	8.3 (M3)	145.23ab	74.50cde	69.20de	64.64a	30.80cd
	6.7 (M4)	133.53bcde	75.66bc	68.08fg	62.61ab	31.92bc
F 值 *F*-value	D	10.14**	13.23**	15.29**	11.62**	15.29**
	M	52.46**	5.85**	5.40**	14.47**	5.40**
	D×M	0.66	8.14**	9.42**	2.77*	9.42**

CRNP: 花前贮存氮转运量对籽粒氮的贡献率; NAP: 花后氮积累量; CNP: 花后氮积累量对籽粒氮的贡献率。同列不同小写字母表示不同处理(播期×密度)在 $P<0.05$ 水平差异显著。*和**表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平差异显著。CRNP: contribution of redistribution amount of nitrogen accumulated pre-anthesis to grain nitrogen; NAP: nitrogen amount accumulated post-anthesis; CNP: contribution of NAP to grain nitrogen. Different lowercase letters in the same column mean significant differences among different treatments of sowing date and density at $P<0.05$ level. * and ** mean significant differences at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively.

2.3 播期与密度对鹰嘴豆产量形成的影响

2.3.1 对鹰嘴豆农艺性状的影响

由图 4 可知, D4 播期的鹰嘴豆株高显著高于 D1、D2, 同播期不同密度间差异不显著。随着播期的延后, 不同密度的鹰嘴豆株高均表现出先降低后升高的趋势, D4>D3>D1>D2, D4 株高显著高于 D1 和 D2。

4 个播期中均以 M4 处理单株荚数最高, M1 处理最低。除 D3 播期各密度鹰嘴豆单株荚数间差异不显著外, 其余播期 M4 密度单株荚数均显著高于 M1。相同密度下, 随着播期推迟, 单株荚数均表现为先升高后下降的趋势, 均为 D3 播期的单株荚数最高。不同播期不同密度对鹰嘴豆单株荚数的影响表现一致, 各播期单株荚数变化均为: M4>M3>M2>M1。不同播期不同密度对鹰嘴豆的单荚粒数和百粒重的影响较小, 各播期各密度间差异不显著。

2.3.2 对鹰嘴豆产量的影响

由图 5 可知, D2、D3、D4 播期下 M3 密度鹰嘴豆产量显著高于 M1。随着播期延后, 不同密度的鹰嘴豆产量均以 D3 播期最高, D1 播期产量最低(D3>D4>D2>D1), D3 播期各密度鹰嘴豆产量分别为 3 852.78 kg·hm^{-2}、5 163.89 kg·hm^{-2}、5 747.22 kg·hm^{-2}、5 288.89 kg·hm^{-2}。各播期内不同密度间产量的表现趋势也相同(M3>M4>M2>M1)。

将 D1、D2、D3、D4 依次设为 0 d、9 d、18 d、27 d, 得到播期、密度与产量的回归方程及其响应面图(图 6):

$$Y=-150.288\ 9+47.169\ 3X_1+464.092\ 5X_2-1.499\ 9X_1^2-11.376\ 4X_2^2+1.292\ 2X_1X_2 \quad (14)$$

式中: Y 为产量, X_1 为播期, X_2 为密度, $R^2=0.870\ 6$。

随着播期延迟和密度的下降, 鹰嘴豆的产量逐渐升高到顶点, 随后开始下降。当 $X_1=25.125$、$X_2=21.824\ 1$ 时, $Y_{max}=5\ 506.485\ 8$, 即当播期 4 月 23 日、密度 7.64 万株·hm^{-2}(株距 21.82 cm)时, 产量达最高(5 506.49 kg·hm^{-2})。

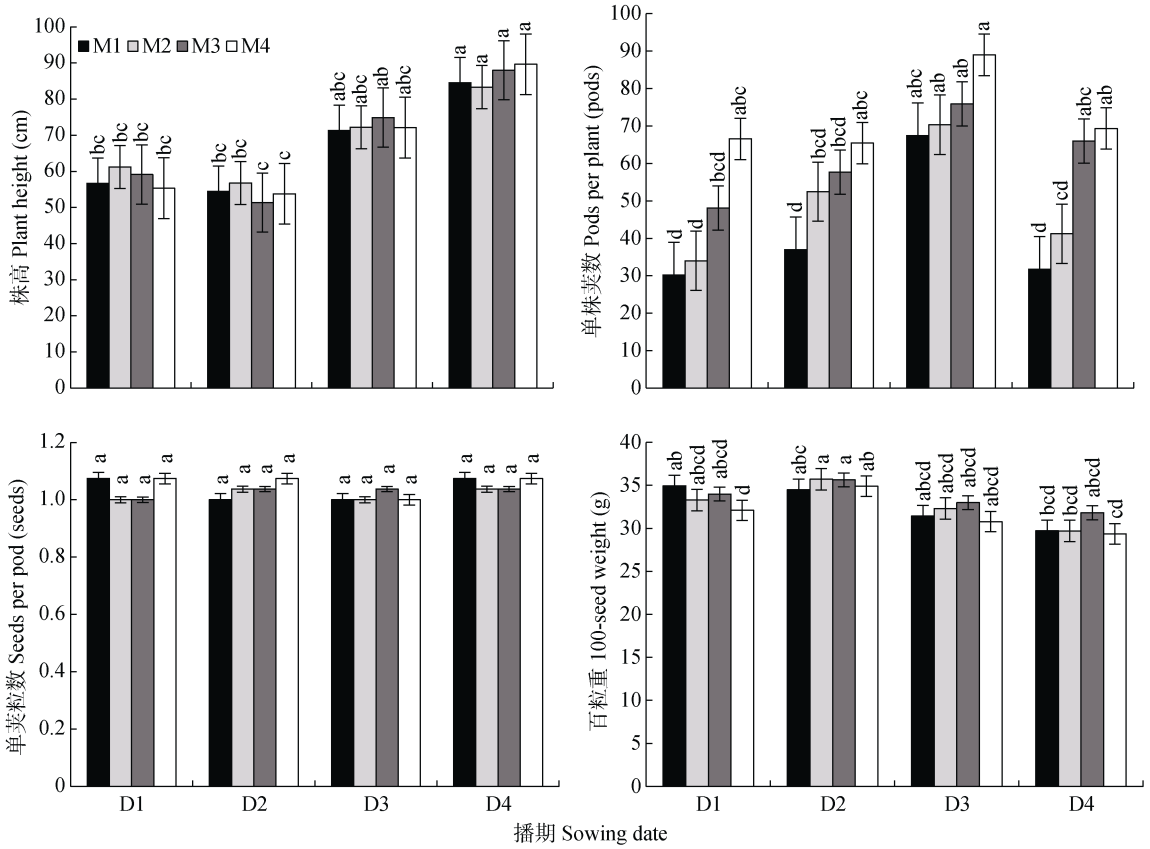

图 4　播期与密度对鹰嘴豆株高、单株荚数、单荚粒数和百粒重的影响

Fig. 4　Effect of sowing date and density on plant height, pods per plant, seeds per pod and 100-seed weight of chickpea

D1、D2、D3 和 D4 分别表示播期为 3 月 29 日、4 月 7 日、4 月 16 日和 4 月 25 日; M1、M2、M3 和 M4 分别表示密度为 16.7 万株·hm^{-2}、11.1 万株·hm^{-2}、8.3 万株·hm^{-2} 和 6.7 万株·hm^{-2}。不同小写字母表示不同处理在 P<0.05 水平差异显著。D1, D2, D3 and D4 are sowing dates of Mar. 29, Apr. 7, 16 and 25, respectively. M1, M2, M3 and M4 indicate densities of 16.7×10^4 plants·hm^{-2}, 11.1×10^4 plants·hm^{-2}, 8.3×10^4 plants·hm^{-2} and 6.7×10^4 plants·hm^{-2}, respectively. Different lowercase letters mean significant differences at P<0.05 level among different treatments.

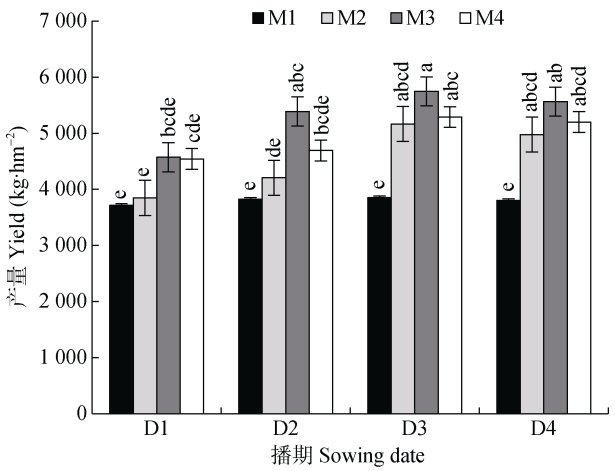

图 5　播期与密度对鹰嘴豆产量的影响

Fig. 5　Effect of sowing date and density on yield of chickpea

D1、D2、D3 和 D4 分别表示播期为 3 月 29 日、4 月 7 日、4 月 16 日和 4 月 25 日; M1、M2、M3 和 M4 分别表示密度为 16.7 万株·hm^{-2}、11.1 万株·hm^{-2}、8.3 万株·hm^{-2} 和 6.7 万株·hm^{-2}。不同小写字母表示不同处理 0.05 水平差异显著。D1, D2, D3 and D4 are sowing dates of Mar. 29, Apr. 7, 16 and 25, respectively. M1, M2, M3 and M4 indicate densities of 16.7×10^4 plants·hm^{-2}, 11.1×10^4 plants·hm^{-2}, 8.3×10^4 plants·hm^{-2} and 6.7×10^4 plants·hm^{-2}, respectively. Different lowercase letters mean significant differences at P<0.05 level among different treatments.

3　讨论

3.1　播期与密度的变化影响鹰嘴豆群体质量

早播鹰嘴豆能够一定程度上促进成熟期提前，但生育期天数长于常规播期和晚播。比较各主要生育期的间隔日数发现，影响早播鹰嘴豆生育期天数的主要为出苗日数。这与新疆地区的大田表现相一致[22,32]。因为鹰嘴豆籽粒较大，发芽时需要的水分较多，较早的播期虽然有利于鹰嘴豆在早春低温条件下春化[32]，但土壤中水分尚未完全融化，影响了种子吸水。随着温度的上升，土壤中有效水分含量增加，晚播的鹰嘴豆的出苗日数更短，而中间播期的鹰嘴豆既能在较低温度下完成春化作用，又能随着气温的逐渐回升满足吸水需求。所以，中间播期可以促进种子萌发，缩短生育期天数。

D4 处理生育期内叶绿素含量最大值出现日期晚于其他 3 个播期，可能是因为晚播鹰嘴豆进入开花期时，叶绿素含量持续增长，开花后 10 d 达最大值。从不同密度对叶绿素含量变化的影响可以看出，

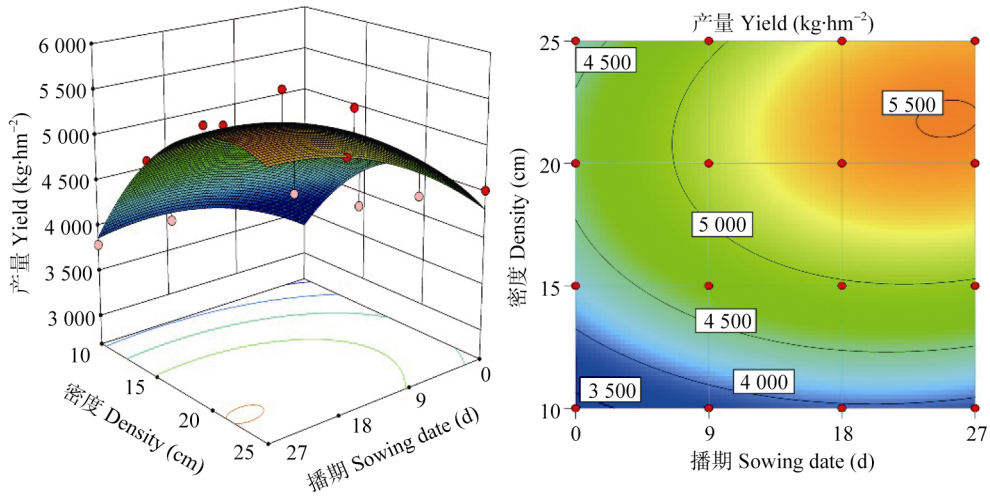

图 6 不同播期与密度对鹰嘴豆产量的互作效应

Fig. 6 Interactive effect of different sowing date and density on yield of chickpea

高密度有助于中、早播期的鹰嘴豆叶绿素含量的增长，中密度适宜晚播鹰嘴豆的叶绿素生成。LAI 能够反映植株与环境因素、栽培条件的干物质分配利用关系[33]。在开花期之前，各播期、密度的 LAI 含量均上升较慢；进入开花期后，不同密度间 LAI 出现明显差异，密度越高，LAI 越大。较大密度的 LAI 达最大值之后下降速度较低密度迅速，是由于花前积累了较大的群体数量，对资源环境过分利用，导致花后水肥等资源缺乏，加快了植株衰老[30]。

各处理间鹰嘴豆的干物质积累变化趋势相近，开花后 10~20 d 积累速率最快，进入成熟期达到干物质积累最大量。D1、D2 播期的干物质最大积累量低于 D3、D4 播期，这与吾尔古丽·艾麦提[22]的研究一致，随着播期延后，土壤温度升高，促使光合产物积累的速度加快。各播期 M1、M2 密度的干物质积累量均低于 M3、M4 密度，是因为植物密度过大，会导致相互遮挡光照，造成田间通风不良，CO_2 浓度低，降低光合强度，同时呼吸强度随之加大，有机物积累减少[34]。各播期花前同化物转运率和花前同化物对籽粒产量的贡献率的最大值均出现在中、低密度，可能是由于单位面积光合能力较小，籽粒的干物质积累更依赖花前同化物的转运。而花后同化物积累量和花后同化物积累量对籽粒产量的贡献率的最大值均出现在中、高密度，表明该密度下鹰嘴豆籽粒的干物质积累更依靠花后同化物的转运。

3.2 播期与密度的变化影响鹰嘴豆碳氮代谢

碳氮代谢的动态变化直接影响作物光合产物的生成、转化及蛋白质的合成[35-36]。叶片的碳同化、根系氮吸收和营养体碳氮转移是籽粒中碳氮的主要来源[37]。本试验各处理中茎的花前碳氮转运效果均高于叶。播期延后引起茎、叶的可溶性糖转运量下降，而可溶性糖转运率和可溶性糖转运量对籽粒淀粉的贡献率变化不大，表明可溶性糖转运量下降的同时，花前可溶性糖积累量和籽粒淀粉含量均发生下降。减小密度会引起各播期鹰嘴豆的可溶性糖转运量一定范围内上升，这与花前同化物转运率的变化相一致。播期、密度及其交互作用均对茎、叶的花前贮存氮转运率产生了显著影响，延后播期或减小密度都会引起茎、叶的花前贮存氮转运率出现先上升后下降，调整播期和密度到适宜范围可以提高花前贮存氮转运率。播期延后造成茎、叶花前贮存氮转运量先上升后下降，这与表 5 中营养器官的花前贮存氮转运量的变化一致。根据花前贮存氮转运量对籽粒氮的贡献率最大值的变化，中、早播的鹰嘴豆配合中密度可以提高花前贮存氮转运量对籽粒氮的贡献率，而中、晚播的鹰嘴豆适用高密度可以提高花前贮存氮转运量对籽粒氮的贡献率。中、低密度的种植有助于提高鹰嘴豆的花后氮积累量，晚播可以获得更高的花后氮积累量对籽粒氮的贡献率。

3.3 播期与密度的变化影响鹰嘴豆产量形成

鹰嘴豆对光温反应较敏感，相同生态区内播期不同，生长进程中受到的光温条件不同，会对产量形成产生不同影响[22]。本试验中，晚播的鹰嘴豆株高高于早播，这与 Kobraee 等[38]的研究不符，可能是因为播期及各播期处理间隔不同，且两地虽然均属温带大陆性气候，但播种期的气温相差 10~15 ℃，鹰嘴豆萌发期的环境因素导致结果不同。单株荚数虽然受播期影响不显著，但从整体上随播期延后呈抛物线趋势，D3 播期的单株荚数高于其他播期，同

时单荚粒数和百粒重受品种本身特性控制，随播期和密度变化波动的幅度较小。因此，产量的变化主要由单株荚数决定。这与郝曦煜等[18]通过对鹰嘴豆资源的多样性分析得出产量与单株荚数呈显著正相关的结论相一致。由方程(14)得出，为达最高产量，鹰嘴豆种植最佳密度为 7.64 万株·hm^{-2}，小于新疆地区的最佳密度[22]，这是由两地气候条件的差异导致的。因此，在今后的研究中应结合气候因素，进一步探讨气候条件和栽培方式与产量之间的关系。

4　结论

中晚播鹰嘴豆的干物质积累量高于中早播。中低密度的花前物质积累对鹰嘴豆产量影响较大，而中高密度的鹰嘴豆花后物质积累对鹰嘴豆产量影响较大。延后播期会导致花前可溶性糖积累量和籽粒淀粉含量下降，而茎、叶花前贮存氮转运率和花前贮存氮转运量则先上升后下降。中早播、中密度或中晚播、高密度鹰嘴豆可以提高花前贮存氮转运量对籽粒氮的贡献率。中、低密度的鹰嘴豆花后氮积累量较高，晚播种植均可以提高鹰嘴豆花后氮积累量对籽粒氮的贡献率。选择适宜的播期与密度能够通过提高干物质的转运率、增强碳氮代谢，同时增加单株荚数，促进鹰嘴豆获得更高的产量。在本试验条件下，对鹰嘴豆品种‘白鹰 1 号’来说，选择播期为 4 月 23 日、密度为 7.64 万株·hm^{-2} 的栽培方式能够获得较高产量。在生产中，可根据当地气候等环境因素的变化进行调整。该结果将为我国东北地区推广鹰嘴豆种植提供重要的理论依据。

参考文献 References

[1] 龙静宜，林黎奋，侯修身，等. 食用豆类作物[M]. 北京：科学出版社, 1989: 305
LONG J Y, LIN L F, HOU X S, et al. Edible Bean Crops[M]. Beijing: Science Press, 1989: 305

[2] 郑卓杰. 中国食用豆类学[M]. 北京：中国农业出版社, 1997: 285
ZHENG Z J. Chinese Food Legumes[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1997: 285

[3] 张旭娜，么杨，崔波，等. 鹰嘴豆功能活性及应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(9): 1983–1988
ZHANG X N, YAO Y, CUI B, et al. Research advance on the biological activity and application of chickpea[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2018, 9(9): 1983–1988

[4] 陈文晋，孔庆全，赵存虎，等. 鹰嘴豆营养功能研究进展[J]. 北方农业学报, 2019, 47(2): 119–123
CHEN W J, KONG Q Q, ZHAO C H, et al. Review of progress in chickpea (*Cicer arietinum*) research[J]. Journal of Northern Agriculture, 2019, 47(2): 119–123

[5] KNUDSEN J C, OTTE J, OLSEN K, et al. Effect of high hydrostatic pressure on the conformation of β-lactoglobulin A as assessed by proteolytic peptide profiling[J]. International Dairy Journal, 2002, 12(10): 791–803

[6] 张俊杰，郭晨，杨旭，等. 鹰嘴豆根瘤菌多样性研究进展[J]. 轻工学报, 2016, 31(6): 1–7
ZHANG J J, GUO C, YANG X, et al. Research progress of the chickpea rhizoibal diversity[J]. Journal of Light Industry, 2016, 31(6): 1–7

[7] VARSHNEY R K, THUDI M, NAYAK S N, et al. Genetic dissection of drought tolerance in chickpea (*Cicer arietinum* L.)[J]. Theoretical and Applied Genetics, 2014, 127(2): 445–462

[8] BHATTARAI T, FETTIG S. Isolation and characterization of a dehydrin gene from *Cicer pinnatifidum*, a drought-resistant wild relative of chickpea[J]. Physiologia Plantarum, 2005, 123(4): 452–458

[9] SHUKLA R K, RAHA S, TRIPATHI V, et al. Expression of CAP2, an APETALA2-family transcription factor from chickpea, enhances growth and tolerance to dehydration and salt stress in transgenic tobacco[J]. Plant Physiology, 2006, 142(1): 113–123

[10] 聂石辉，彭琳，王仙，等. 鹰嘴豆种质资源农艺性状遗传多样性分析[J]. 植物遗传资源学报, 2015, 16(1): 64–70
NIE S H, PENG L, WANG X, et al. Genetic diversity of agronomic traits in chickpea (*Cicer arietinum* L.) germplasm resources[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2015, 16(1): 64–70

[11] 郝曦煜，梁杰，郭文云，等. 白城市特色食用豆产业发展优势分析[J]. 东北农业科学, 2019, 44(1): 87–90
HAO X Y, LIANG J, GUO W Y, et al. Analysis of advantages of development of characteristic food legumes industry in Baicheng[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2019, 44(1): 87–90

[12] 陈文晋，孔庆全，赵存虎，等. 鹰嘴豆种质资源主要农艺性状遗传多样性分析[J]. 北方农业学报, 2018, 46(5): 9–18
CHEN W J, KONG Q Q, ZHAO C H, et al. Analysis of genetic diversity of the main agronomic traits of chickpea germplasm resources[J]. Journal of Northern Agriculture, 2018, 46(5): 9–18

[13] 胡焕焕. 播种期和密度对冬小麦群体质量和产量的调控效应[D]. 保定：河北农业大学, 2008
HU H H. Effect of planting date and planting density on the population quality and grain yield of winter wheat[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2008

[14] 雷锦雯. 不同播种方式与播量对冬小麦群体质量与产量构成的调控效应[D]. 郑州：河南农业大学, 2017
LEI J W. Effects of different sowing methods and planting densities on group quality and yield components of winter wheat[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2017

[15] 李龙. 不同播期及氮肥基追比对大豆产量品质及氮代谢的影响[D]. 南京：南京农业大学, 2016
LI L. Effects on soybean yield and quality and nitrogen metabolism under different sowing and ratio of nitrogen basal and topdressing[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016

[16] 孙学磊. 播期和密度对小麦产量形成和品质的影响[D]. 杨凌：西北农林科技大学, 2017
SUN X L. Effects of sowing date and density on yield formulation and quality of wheat[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2017

[17] 刘少坤. 播期和密度对登海 618 高产机理影响的研究[D].

泰安: 山东农业大学, 2017
LIU S K. The study on the effect of sowing date and density on the high yield mechanism of Denghai 618[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2017

[18] 郝曦煜, 杨涛, 梁杰, 等. 160 份外引鹰嘴豆种质主要农艺性状的遗传多样性分析[J]. 植物遗传资源学报, 2020, 21(4): 875–883
HAO X Y, YANG T, LIANG J, et al. Genetic diversity analysis of major agronomic traits in 160 introduced chickpea (*Cicer arietinum* L.) germplasm resources[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2020, 21(4): 875–883

[19] 邵千顺, 关耀兵, 程炳文, 等. 鹰嘴豆种质资源多样性评价[J]. 西北农业学报, 2017, 26(12): 1803–1812
SHAO Q S, GUAN Y B, CHENG B W, et al. Diversity evaluation of germplasm resources of chickpea[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2017, 26(12): 1803–1812

[20] 邵千顺, 杨琳. 鹰嘴豆种质资源筛选及多样性分析[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(34): 16–19
SHAO Q S, YANG L. Screening of *Cicer arietinum* germplasm resources and their diversity analysis[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2017, 45(34): 16–19

[21] 张金波, 李利民, 苗昊翠, 等. 鹰嘴豆种质资源主要农艺性状遗传多样性研究[J]. 新疆农业科学, 2014, 51(1): 110–117
ZHANG J B, LI L M, MIAO H C, et al. Genetic diversity analysis of the chickpea germplasm resources based on agronomic traits[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2014, 51(1): 110–117

[22] 吾尔古丽·艾麦提. 新疆鹰嘴豆产量和品质关键栽培技术调控研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008
WUERGULI. Regulation studies on key cultivation technique for yield and quality of chickpea in Xinjiang[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2008

[23] 关耀兵, 牛永岐, 周丽蕾, 等. 密度对鹰嘴豆主要性状及种子产量的影响[J]. 种子, 2018, 37(1): 130–132
GUAN Y B, NIU Y Q, ZHOU L L, et al. The influence of density on the main characters and seed yield of chickpeas[J]. Seed, 2018, 37(1): 130–132

[24] 买合木提·艾尼. 不同种植密度对鹰嘴豆产量的影响[J]. 新疆农业科技, 2014, (1): 45–46
MAIHEMUTI. Effect of different planting density on yield of chickpea[J]. Xinjiang Agricultural Science and Technology, 2014, (1): 45–46

[25] SHIFERAW M, TAMADO T, ASNAKE F. Effect of plant density on yield components and yield of Kabuli chickpea (*Cicer arietinum* L.) varieties at Debre Zeit, central Ethiopia[J]. International Journal of Plant & Soil Science, 2018, 21(6): 1–6

[26] MACHADO S, HUMPHREYS C, TUCK B, et al. Seeding date, plant density, and cultivar effects on chickpea yield and seed size in eastern Oregon[J]. Crop Management, 2006, 5(1): 1–7

[27] RUBIALES D, ALCÁNTARA C, PÉREZ-DE-LUQUE A, et al. Infection of chickpea (*Cicer arietinum*) by crenate broomrape (*Orobanche crenata*) as influenced by sowing date and weather conditions[J]. Agronomie, 2003, 23(4): 359–362

[28] BEECH D F, LEACH G J. Effect of plant density and row spacing on the yield of chickpea (cv. Tyson) grown on the Darling Downs, south-eastern Queensland[J]. Australian Journal of Experimental Agriculture, 1989, 29(2): 241–246

[29] 宗绪晓, 关建平, 李玲, 等. 鹰嘴豆种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2012
ZONG X X, GUAN J P, LI L, et al. Descriptors and Data Standard for Chickpea (*Cicer* spp.)[M]. Beijing: China Agriculture Science and Technology Press, 2012

[30] 孙中伟. 不同播种方式下播期与播量对小麦籽粒产量和品质形成的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2011: 15–82
SUN Z W. Effects of different sowing dates and sowing quantities on yield, quality formation of wheat in different planting ways[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011: 15–82

[31] 周琴, 姜东, 戴廷波, 等. 不同基因型小麦籽粒蛋白质和淀粉积累与碳氮转运的关系[J]. 南京农业大学学报, 2002, (3): 1–4
ZHOU Q, JIANG D, DAI T B, et al. Grain protein and starch accumulation and its relationship to remobilization of carbon and nitrogen in different wheat genotypes[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2002, (3): 1–4

[32] 库尔班·尼扎米丁. 鹰嘴豆在旱作条件下不同播种期对产量影响的研究[J]. 新疆农业科学, 2008, 45(1): 175–179
KUERBAN N. Study on the effect of different souring seasons on yield of *Cicer arietinum* under non-irrigation condition in the North Xinjiang[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2008, 45(1): 175–179

[33] 曹宏鑫, 刘世军, 张立民, 等. 小麦群体叶面积的动态模型[J]. 沈阳农业大学学报, 2000, 31(3): 246–248
CAO H X, LIU S J, ZHANG L M, et al. Modeling for canopy leaf area for wheat[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2000, 31(3): 246–248

[34] 杨文平. 行距和密度对冬小麦冠层结构、微环境及碳氮代谢的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2008
YANG W P. Effects of row spacing and planting density on canopy structure, microclimate and carbon-nitrogen metabolism of winter wheat (*Triticum aestivum* L.)[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2008

[35] 王文静, 高松洁, 梁月丽, 等. 不同穗型小麦品种灌浆期碳氮代谢特点及其与源库的关系[J]. 华北农学报, 2003, 18(2): 29–32
WANG W J, GAO S J, LIANG Y L, et al. Study on C-N metabolic characteristics and source-sink relationship during grain filling stage in two winter wheat cultivars with different spike type[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2003, 18(2): 29–32

[36] 冯伟, 罗毅, 郭天财, 等. 灌水对不同穗型小麦碳氮代谢及籽粒灌浆的影响[J]. 麦类作物学报, 2008, 28(6): 1036–1041
FENG W, LUO Y, GUO T C, et al. Effect of irrigation on carbon and nitrogen metabolism and grain filling in winter wheat with different spike-types[J]. Journal of Triticeae Crops, 2008, 28(6): 1036–1041

[37] 朱新开, 严六零, 郭文善, 等. 淮北稻茬超高产小麦碳氮代谢特征研究[J]. 麦类作物学报, 2002, 22(1): 51–55
ZHU X K, YAN L L, GUO W S, et al. Carbon-nitrogen characteristics of super-high yielding wheat after rice in Huaibei Region[J]. Journal of Triticeae Crops, 2002, 22(1): 51–55

[38] KOBRAEE S, SHAMSI K, RASEKHI B, et al. Investigation of correlation analysis and relationships between grain yield and other quantitative traits in chickpea (*Cicer arietinum* L.)[J]. African Journal of Biotechnology, 2010, 9(16): 2342–2348