中国农业大学学报 2024,29(7):139-147
Journal of China Agricultural University http://zgnydxxb.ijournals.cn

张美微,穆蔚林,郭涵潇,李川,张盼盼,何佳雯,牛军,乔江方.错株种植对密植夏玉米碳氮分配的影响[J].中国农业大学学报,2024,29(07):139-147.
ZHANG Meiwei, MU Weilin, GUO Hanxiao, LI Chuan, ZHANG Panpan, HE Jiawen, NIU Jun, QIAO Jiangfang. Effects of staggered planting on carbon and nitrogen allocation of summer maize with close planting[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(07): 139-147.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.07.13

错株种植对密植夏玉米碳氮分配的影响

张美微 穆蔚林 郭涵潇 李川 张盼盼 何佳雯 牛军 乔江方*
(河南省农业科学院 粮食作物研究所,郑州 450002)

摘 要 为探明错株种植方式对黄淮海地区密植夏玉米植株碳氮代谢的调控作用,以'郑单958'为材料,设置6.75万(D_1)、8.25万(D_2)和9.00万株/hm^2(D_3)3个密度水平,错株(S)和对株(CK)种植2种方式,测定植株氮素(N)和非结构性碳水化合物(NSC)的积累量、花前转运量、花前转运效率、花前转运对籽粒的贡献率、花后积累量以及收获指数。结果表明:1)增加种植密度可显著提高植株N和NSC的积累量、花前转运量和花后积累量,但降低了N和NSC转运效率及其对籽粒的贡献率($P<0.05$);过高密植水平(D_3)不利于籽粒中碳氮的积累和转运;其中,碳氮积累和转运量以D_2最高。2)错株种植(S)可显著增加夏玉米植株N和NSC的积累量,促进N和NSC花前的转运和花后的积累,并可显著提高花前N和NSC转运效率($P<0.05$)。3)在各处理组合中,D_2S的N和NSC积累量、花前转运量和花后积累量均显著高于其他处理($P<0.05$),且D_2S的N和NSC转运效率及其对籽粒的贡献率与对照(D_1CK)相比并未显著下降。综上,黄淮海地区夏玉米在8.25万株/hm^2密植(D_2)水平下采取错株(S)种植方式可显著提高整株的氮素和非结构性碳水化合物的积累,并促进其向籽粒的转运,获得较高的N、NSC收获指数和产量。

关键词 夏玉米;错株种植;密植;氮素;非结构性碳水化合物
中图分类号 S513 **文章编号** 1007-4333(2024)07-0139-09 **文献标志码** A

Effects of staggered planting on carbon and nitrogen allocation of summer maize with close planting

ZHANG Meiwei, MU Weilin, GUO Hanxiao, LI Chuan, ZHANG Panpan, HE Jiawen, NIU Jun, QIAO Jiangfang*
(Cereal Crops Institute, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China)

Abstract In order to explore the effects of planting density and staggered planting on carbon and nitrogen allocation in summer maize, 'Zhengdan 958' was taken as the material. Three planting densities (D_1 as 6.75×10^4 plants/hm^2, D_2 as 8.25×10^4 plants/hm^2 and D_3 as 9.00×10^4 plants/hm^2) and two panting patterns (CK as the parallel planting pattern and S as the staggered planting pattern) were set. The nitrogen and non-structural carbohydrate (NSC) accumulation in plant organs at both silking stage and maturity stage, translocation amount of pre-silking, translocation rate of pre-silking, contribution rate of translocation amount of pre-silking, and accumulation of post-silking for nitrogen and NSC were determined. The results showed that: 1) Increasing planting density significantly increased the accumulation, pre-silking translocation and post-silking accumulation of nitrogen and NSC ($P<0.05$). Nevertheless, it significantly reduced nitrogen and NSC translocation efficiency and their contribution to grains ($P<0.05$). The high

收稿日期:2024-01-10
基金项目:国家重点研发计划(2022YFD2300805,2022YFD2300803);河南省科技攻关(242102110165);河南省农业科学院自主创新项目(2024ZC009)
作者简介:张美微(ORCID:0000-0001-6864-2331),助理研究员,主要从事玉米栽培生理研究,E-mail:zhangmeiwei1986@163.com
通讯作者:乔江方(ORCID0000-0001-8502-3786),副研究员,主要从事玉米高产栽培研究,E-mail:qiaojf@126.com

planting density of D_3 was disadvantage to the accumulation and transport of carbon and nitrogen in grains ($P<0.05$). 2) The S planting pattern significantly increased the nitrogen and NSC accumulation of plants, promoted the nitrogen and NSC pre-silking translocation and post-silking accumulation, improved NSC translocation efficiency ($P<0.05$). 3) Among all combination treatments, the nitrogen and NSC accumulation, nitrogen and NSC pre-silking translocation and post-silking accumulation in combination D_2S were all higher than those in other combinations, and there was no significant decline in translocation rate of pre-silking and contribution rate of pre-silking translocation amount compared with D_1CK, which meant D_2S was the optimal planting pattern in this study ($P<0.05$). Therefore, under the planting level of 8.25×10^4 plants/hm^2 for summer maize planting in Huang-huai-hai area, adoption of staggered planting method can significantly increase the carbon and nitrogen accumulation, promote their transportation to grains, and obtain higher nitrogen harvest index, NSC harvest index and yield.

Keywords summer maize; staggered planting; close planting; nitrogen; non-structural carbohydrate

玉米作为我国第一大粮食作物,兼具经济、饲料作物等多种用途,对我国粮食安全和国民经济发展具有重要的影响;然而,我国耕地资源有限,提高玉米单产仍是保障玉米长期供需平衡的有效途径[1]。增加种植密度是提高玉米单产的关键技术途径。目前,我国玉米种植密度最高的新疆北部,密度水平可达10.5万~12.0万株/hm^2,平均产量为16 800 kg/hm^2;而黄淮海地区玉米密度在6.22万~7.09万株/hm^2,平均产量为8 910 kg/hm^2[2]。因此,密度是限制该区域玉米产量潜力发挥的关键因素。近年来,随着紧凑型耐密植玉米新品种的推广和应用,合理提高种植密度已经成为实现玉米单产提升的最主要措施。然而,已有研究表明单位面积的玉米产量随着密度的增加呈抛物线变化[3-5]。此外,随着种植密度的不断增加,群体叶片遮蔽,严重影响中下部叶片光合作用,易造成茎秆纤细,后期倒伏风险增大[6]。因此,开展玉米密植群体植株碳氮分配特征及其调控机理研究,对挖掘玉米产量潜力和增强生育后期抗倒伏风险具有重要的意义。

改变玉米种植田间布局可以有效改善密植群体叶片相互遮荫,协调个体和群体关系[7]。玉米在高密植条件下,合理的种植模式可以优化群体冠层结构,改善田间通风透光环境。已有关于"蜂巢式"[8]"三角留苗"[9]和"双行交错"[10]等种植方式的研究结果均表明,均匀的植株空间布局更有利于挖掘玉米产量潜力,获得高产。错株种植是通过改变相邻两行玉米植株空间布局,优化冠层结构,提高群体光能截获和利用,实现密植增产的1种种植模式[11]。增加种植密度使玉米植株下部叶片衰老加速,光合碳向根系的转运量降低,根系吸收能力下降,显著减少根系对氮素的吸收和对地上部氮素的供给,植株光合产物的供应能力受到抑制,从而限制了产量的提高[12]。然而,在黄淮海地区有限的光温资源条件下,错株密植的玉米获得高产的碳氮代谢机制仍不明确,尤其是在高密植条件下错株种植对协调植株物质积累和转运获得高产的机理研究鲜见报道。本研究以'郑单958'为材料,设置不同密植水平和种植方式处理,测定玉米植株氮素和非结构性碳水化合物积累、分配和转运利用特征等参数,旨在明确种植密度和种植方式对植株碳氮分配的影响,以期为密植玉米高效生产技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料及试验设计

供试玉米品种为'郑单958',于2021年在河南省西华县(33°42′49″ N, 114°32′12″ E)开展大田试验。0—20 cm耕层土壤基础理化性质为:pH 8.42、有机质20.6 g/kg、全氮1.4 g/kg、水解氮87.4 mg/kg、有效磷20.3 mg/kg、速效钾254 mg/kg。试验采用二因素随机区组试验设计,种植密度设置6.75万(D_1)、8.25万(D_2)、9.00万株/hm^2(D_3)3个水平;种植方式设置错株种植(S)和对株种植(CK)2种;共6个处理,各处理重复3次,共计18个小区。小区采用等行距种植,行距为0.6 m,小区面积为5 m×3 m=15 m^2。夏玉米播种和收获日期分别为6月11日和9月22日。

1.2 测定项目及方法

1.2.1 干物质积累

各小区于夏玉米吐丝期和成熟期选取3株玉米植株,将植株分成叶片、茎秆和籽粒3部分。样品处

理后放入105 ℃烘箱杀青30 min，80 ℃烘干至恒重。称取各部分干重后粉碎待测。

1.2.2　氮素积累和转运

植株氮素含量测定采用流动分析仪进行[13]。称取粉碎后样品于消煮管中，经浓硫酸消煮后定容摇匀，使用流动分析仪（德国SEAL，Auto Analyzer 3-AA3）测定各器官氮素含量。并计算以下指标：

各器官氮素积累量＝各器官干物质重量×各器官全氮百分含量；

花前氮素转运量（N translocation amount of pre-silking，NTA）＝吐丝期茎叶氮素积累量－成熟期茎叶氮素积累量；

花前氮素转运率（N translocation rate of pre-silking，NTR）＝花前氮素转运量/吐丝期茎叶氮素积累量×100%；

花前氮素转运量对籽粒氮素贡献率（contribution rate of N translocation amount of pre-silking，CNTA）＝花前氮素转运量/成熟期籽粒氮素积累量×100%；

花后氮素积累量（N accumulation amount of post-silking，NAA）＝成熟期植株氮素积累量－吐丝期植株氮素积累量；

氮素收获指数（N harvest index，NHI）＝成熟期籽粒氮素积累量/成熟期植株氮素积累量。

1.2.3　非结构性碳水化合物积累和转运

可溶性糖和淀粉含量总和即为非结构性碳水化合物（non-structural carbohydrate，NSC）含量。采用蒽酮-硫酸比色法[14]测定可溶性糖和淀粉含量。

各器官NSC积累量＝各器官干物质重量×各器官NSC含量

花前NSC转运量（NSC translocation amount of pre-silking，NSCTA）、转运率（NSC translocation rate of pre-silking，NSCTR）、花前NSC转运量对籽粒的贡献率（contribution rate of NSC translocation amount of pre-silking，CNSCTA），花后NSC积累量（NSCAA）和收获指数（NSC harvest index，NSCHI）计算方法同氮素相关指标计算。

1.3　统计分析

利用Excel 2016进行整理汇总数据，使用SPSS 20软件进行数据分析处理。各处理间差异性分析采用Duncan在$P<0.05$显著水平上进行多重比较。图表绘制使用Excel 2016完成。

2　结果与分析

2.1　错株增密对夏玉米碳氮积累转运影响的方差分析

由表1可知，种植密度对夏玉米植株碳氮积累和转运均有极显著影响（$P<0.01$），而种植方式对玉米花前氮素转运量（NTA）、花后NSC积累量（NSCAA）、氮素收获指数（NHI）和NSC收获指数（NSCHI）均有极显著的影响（$P<0.01$），而对花后氮素积累量（NAA）和花前NSC转运量（NSCTA）无显著影响；在互作效应方面，种植密度×种植方式对花前氮素转运量（NTA）、花前NSC转运量（NSCTA）和花后NSC积累量（NSCAA）均产生显著影响（$P<0.01$，$P<0.05$），而二因素互作效应在花后氮素积累量（NAA）、氮素收获指数（NHI）和NSC收获指数（NSCHI）方面并未产生显著影响。

表1　种植密度和方式对夏玉米植株碳氮积累转运影响的方差分析

Table 1　Variance analysis of panting density and pattern on grain yield，nitrogen and carbon translocation，and accumulation mount in summer maize

变异来源 Source of variation	NTA	NAA	NSCTA	NSCAA	NHI	NSCHI
种植密度 Planting density	10.73**	24.96**	6.70**	105.00**	26.31**	41.37**
种植方式 Planting pattern	29.51**	1.86	1.50	51.16**	12.45**	26.20**
种植密度×种植方式 Planting density×Planting pattern	9.15**	1.98	7.99**	5.10*	1.28	1.70

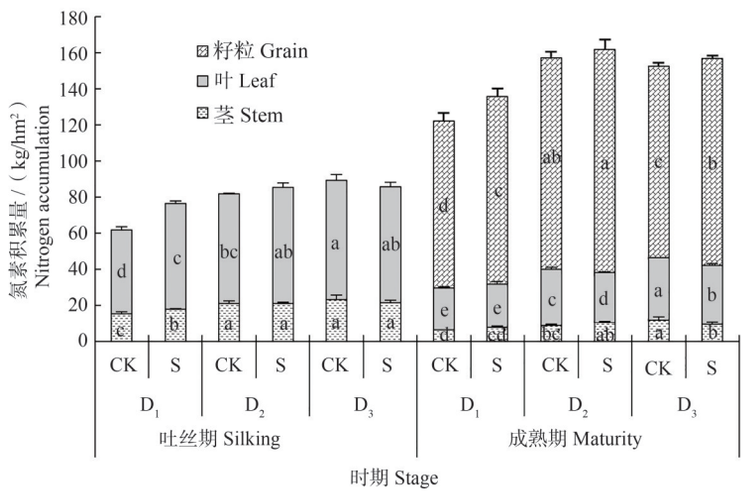
注：NTA，花前氮素转运量；NAA，花后氮素积累量；NSCTA，花前非结构性碳水化合物转运量；NSCAA，花后非结构性碳水化合物积累量；NHI，氮素收获指数；NSCHI，非结构性碳水化合物收获指数。*和**分别代表$P<0.05$和$P<0.01$显著水平。

Note：NTA，nitrogen translocation amount of pre-silking；NAA，nitrogen accumulation amount of post-silking；NSCTA，NSC translocation amount of pre-silking；NSCAA，NSC accumulation amount of post-silking；NHI，nitrogen harvest index；NSCHI，NSC harvest index. * and ** indicated significantly different at 0.05 and 0.01 level，respectively.

2.2 错株增密对夏玉米氮素积累和转运的影响

由图1可知，吐丝期夏玉米植株氮素积累随着种植密度的增加而增加，对株种植（CK）条件下，D_2（8.25万株/hm^2）水平的地上部总氮素积累量较D_1（6.75万株/hm^2）增加31.95%，其中茎秆和叶片氮素积累量分别增加38.22%和29.89%；D_3（9.00万株/hm^2）的地上部总氮素积累量较D_1增加44.14%，其中茎秆和叶片氮素积累分别增加52.34%和41.45%。错株种植（S）条件下，D_2的地上部总氮素积累量较D_1增加11.57%，其中茎秆和叶片氮素积累分别增加18.34%和9.52%；D_3的地上部总氮素积累量较D_1增加12.13%，其中茎秆和叶片氮素积累分别增加20.96%和9.44%。提高种植密度也可增加夏玉米成熟期植株氮素积累量，对株种植（CK）条件下，D_2和D_3分别较D_1的地上部氮素积累量增加28.72%和24.78%；其中，茎秆氮素积累量分别增加42.23%和86.84%，叶片氮素积累量分别增加33.36%和48.25%，籽粒氮素积累量分别增加26.63%和14.66%。错株种植（S）条件下，D_2和D_3分别较D_1地上部氮素积累量增加19.44%和15.58%；其中，茎秆氮素积累量分别增加33.64%和25.10%，叶片氮素积累量分别增加15.27%和34.53%，籽粒氮素积累量分别增加19.38%和10.46%。

不同密植水平间种植方式对夏玉米植株氮素积累的影响不同。S显著增加了D_1吐丝期茎秆和叶片中氮素积累量（$P<0.05$），地上部总氮素积累量较CK升高23.44%，其中茎秆和叶片的氮素积累量分别增加16.34%和25.75%；S也使成熟期D_1和D_3的籽粒、D_2中茎秆氮素积累量分别增加11.96%、7.86%、12.96%（图1）。此外，各处理组合相比，吐丝期D_3的CK和成熟期D_2的S处理均获得了较高的地上部氮素总积累量，分别较D_1的CK增加44.14%和32.53%（$P<0.05$）；其中，D_3的CK茎秆和叶片的增幅分别为52.34%和41.45%，D_2的S茎秆、叶片、籽粒的增幅分别为60.66%、20.36%、33.66%（$P<0.05$）。



D_1、D_2和D_3分别为种植密度6.75万、8.25万和9.00万株/hm^2；CK和S分别为对株和错株种植。不同小写字母代表差异显著（$P<0.05$）。下同。

D_1, D_2 and D_3 are 6.75×10^4, 8.25×10^4 and 9×10^4 plants/hm^2 density, respectively. CK and S are parallel and staggered planting, respectively. Different lowercase letters indicate significantly different at $P<0.05$. The same below.

图1 不同密度和种植方式下夏玉米植株的氮素积累

Fig. 1 Nitrogen accumulation in summer maize with different planting density and pattern

由表2可知，错株增密对夏玉米氮素转运也存在显著的影响。花前氮素转运量和花后氮素积累量均随着种植密度的增加而增加，对株种植（CK）条件下，D_2和D_3分别较D_1花前氮素转运量增加28.94%和32.84%，D_2较D_1花后氮素积累量增加25.38%（$P<0.05$）；错株种植（S）条件下，D_2较D_1花前氮素转运量增加32.84%，D_2和D_3分别较D_1花后氮素积累量增加27.20%和20.03%（$P<0.05$）。而增加种植密度显著降低了花前氮素转运效率和花前氮素转运对籽粒的贡献率。其中，CK和S种植下D_3花前氮素转运效率分别较D_1降低7.94%和12.88%（$P<0.05$）；S条件下D_2和D_3分别较D_1花前氮素转运对籽粒的贡献率分别降低11.48%和11.57%（$P<0.05$）。同样，增加密度使得氮素收获

表 2　种植密度和方式对夏玉米植株氮素转运的影响

Table 2　Effect of planting density and pattern on nitrogen translocation of summer maize

密度 Density	种植方式 Planting pattern	NTA/(kg/hm²)	NTR/%	CNTA/%	NAA/(kg/hm²)	NHI
D_1	CK	32.30 c	52.27 c	34.90 c	60.32 b	0.76 a
	S	44.49 ab	58.31 a	42.94 a	59.21 b	0.77 a
D_2	CK	41.65 b	51.07 c	35.53 c	75.63 a	0.75 ab
	S	47.06 a	55.25 b	38.01 bc	76.73 a	0.77 a
D_3	CK	42.91 ab	48.12 d	40.46 ab	63.29 b	0.70 c
	S	43.48 ab	50.80 c	37.97 bc	71.07 a	0.73 b

注：NTR，花前氮素转运效率；CNTA 花前氮素转运对籽粒的贡献率。下同。

Note: NTR: nitrogen translocation rate of pre-silking; CNTA, contribution rate of nitrogen translocation amount of pre-silking. The same below.

指数降低，且在 D_3 密植水平下达到显著水平（$P<0.05$），CK 和 S 条件下 D_3 氮素收获指数较 D_1 分别下降 7.89% 和 5.19%。

S 较 CK 可显著提高不同密植水平下氮素的转运，D_1、D_2 和 D_3 的花前氮素转运量分别升高 37.74%、12.98% 和 1.32%，其中 D_1 和 D_2 达到显著水平（$P<0.05$）；花前氮素转运效率分别升高 11.56%、8.17% 和 5.56%（$P<0.05$）；氮素收获指数分别升高 1.32%、2.68% 和 4.78%，仅 D_3 达到显著水平（$P<0.05$）；D_1 和 D_2 的花前氮素转运对籽粒的贡献率分别升高 23.05% 和 6.98%，仅 D_1 达到显著水平（$P<0.05$）；D_2 和 D_3 花后氮素积累量分别升高 1.45% 和 12.30%，仅 D_3 达到显著水平（$P<0.05$）。各处理组合相比，D_2S 的花前氮素转运量、花后氮素积累量显著高于其他处理，较 D_1CK 分别升高 45.70% 和 27.20%（$P<0.05$）；而 D_1S 的花前氮素转运效率和花前氮素转运对籽粒的贡献率显著高于其他处理（$P<0.05$）。

2.3　错株增密对夏玉米非结构性碳水化合物积累与转运的影响

由图 2 可知，增加种植密度显著提高了夏玉米植株 NSC 的积累。CK 条件下，D_2 吐丝期地上部总 NSC 积累量较 D_1 增加 15.09%，其中茎秆和叶片 NSC 积累量分别增加 8.62% 和 21.53%（$P<0.05$）；D_3 地上部总 NSC 积累量分别较 D_1 增加 6.47%，其中叶片 NSC 积累增加 14.43%（$P<0.05$），而茎秆出现小幅下降，降幅为 1.54%。S 条件下，D_2 吐丝期地上部总 NSC 积累量较 D_1 增加 8.90%，其中叶片 NSC 积累量增加 13.92%（$P<0.05$）；D_3 地上部总 NSC 积累量较 D_1 增加 8.67%，其中茎秆中 NSC 积累量增加 7.83%。提高种植密度也可增加夏玉米成熟期植株 NSC 积累量，CK 条

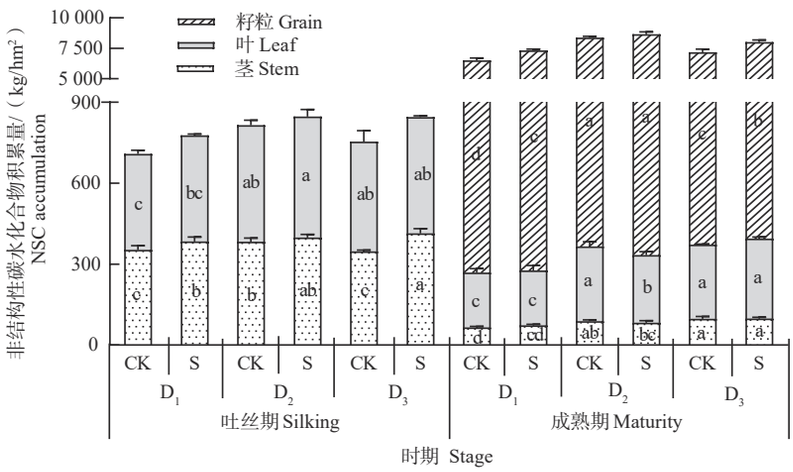


图 2　不同密度和种植方式下夏玉米植株非结构性碳水化合物的积累

Fig. 2　Non-structural carbohydrate accumulation in summer maize with different planting density and pattern

件下，D_2和D_3分别较D_1地上部NSC积累量增加28.59%和10.25%；其中，茎秆NSC积累量分别增加35.62%和49.74%（$P<0.05$），叶片NSC积累量分别增加36.42%和34.86%（$P<0.05$），籽粒NSC积累量分别增加28.26%和9.04%。S条件下，D_2和D_3分别较D_1地上部NSC积累量增加18.21%和9.53%；其中，D_3茎秆NSC积累量增加33.08%（$P<0.05$），D_2和D_3叶片NSC积累量分别增加23.54%和45.98%（$P<0.05$），籽粒NSC积累量分别增加18.12%和8.23%（$P<0.05$）。

S提高了不同密植水平下器官NSC的积累量。在D_1、D_2和D_3种植水平下，夏玉米吐丝期S较CK的植株总NSC积累量分别增加9.83%、3.92%和12.09%；其中茎秆和叶片的增加量分别为8.90%和10.75%（D_1）、4.03%和3.82%（D_2）、19.27%和5.96%（D_3），且D_1和D_3间的差异均达显著水平（$P<0.05$）。S较CK成熟期植株NSC的总积累量分别增加12.23%（D_1）、3.18%（D_2）和11.49%（D_3）；而在不同器官NSC积累则存在差异，S成熟期D_1和D_3籽粒中NSC的积累量分别增加12.63%和11.79%（$P<0.05$）。各处理组合相比，D_2S总NSC积累量最高，分别较D_1的CK总NSC增加19.60%（吐丝期）和32.67%（成熟期）；其中，吐丝期茎秆和叶片NSC增加量分别为12.99%和26.15%（$P<0.05$），成熟期茎秆、叶片、籽粒的增加量分别为26.34%、23.51%和33.04%（$P<0.05$）。

由表3可知，种植密度和种植方式及其互作也显著影响夏玉米NSC的转运。种植密度由D_1增加至D_2后，花前NSC转运量和花后NSC积累量均增加，CK条件下较D_1分别增加2.17%和30.23%；S条件下较D_1分别增加2.47%和19.32%；且仅对花后NSC积累量的影响达到显著水平（$P<0.05$）。而当种植密度由D_2继续增加至D_3后，花前NSC转运量和花后NSC积累量则均出现显著下降；CK条件下D_3花前NSC转运量和花后NSC积累量分别较D_2降低15.00%和15.89%（$P<0.05$），S条件下D_3较D_2分别下降12.22%和7.24%（$P<0.05$）。这说明，过高的种植密度主要降低了花前NSC转运量。花前NSC转运效率和花前NSC转运对籽粒的贡献率则随着种植密度的增加而显著降低，CK条件下D_2和D_3的花前NSC转运效率较D_1分别降低11.11%和18.26%，S条件下D_2和D_3较D_1分别降低6.02%和17.25%；CK条件下D_2和D_3的花前NSC转运对籽粒的贡献率分别较D_1均降低20.45%，S条件下的相应降幅分别为13.36%和16.88%；且CK和S的D_3与D_1花前NSC转运效率和花前NSC转运对籽粒的贡献率均达到显著水平（$P<0.05$）。NSC收获指数也随着密度的增加呈下降趋势，仅在种植密度增加至D_3时，降幅达到显著水平，CK和S条件下分别较D_1下降1.15%和1.14%（$P<0.05$）。

S较CK均可显著提高夏玉米花前NSC转运量，D_1、D_2和D_3密度分别较CK增加13.97%、14.31%和17.96%，D_2和D_3密植水平下增加幅度均达到显著水平（$P<0.05$）。同样，S也可提高花后NSC积累量，且在D_1和D_3密度下达到显著水平（$P<0.05$）；其中，D_1、D_2和D_3密度下分别较CK增加12.53%、3.10%和13.70%。S也可不同程度地提高花前NSC转运效率、花前NSC转运对籽粒的贡献率和NSC收获指数，仅D_2的花前NSC转运效

表3 种植密度和方式对夏玉米植株非结构性碳水化合物转运的影响

Table 3 Effect of planting density and pattern on non-structural carbohydrate translocation of summer maize

种植密度 Planting density	种植方式 Planting pattern	NSCTA/(kg/hm²)	NSCTR/%	CNSCTA/%	NSCAA/(kg/hm²)	NSCHI
D_1	CK	439.43 bc	61.95 a	7.04 a	5 811.82 d	0.959 ab
	S	500.84 ab	64.40 a	7.11 a	6 539.90 c	0.962 a
D_2	CK	448.95 b	55.07 b	5.60 b	7 568.95 a	0.956 bc
	S	513.21 a	60.52 a	6.16 ab	7 803.40 a	0.961 a
D_3	CK	381.76 c	50.64 b	5.60 b	6 365.93 c	0.948 d
	S	450.50 b	53.29 b	5.91 b	7 238.22 b	0.951 c

注：NSCTR，花前非结构性碳水化合物转运效率；CNSCTA，花前非结构性碳水化合物转运对籽粒的贡献率。

Note: NSCTR, NSC translocation rate of pre-silking; CNSCTA, Contribution rate of NSC translocation amount of pre-silking.

率较CK升高9.90%（$P<0.05$）。各处理组合间相比，D_2S花前NSC转运量和花后NSC积累量均为最高，较D_1CK分别升高16.79%和34.27%（$P<0.05$）；而D_1S花前NSC转运效率、花前NSC转运对籽粒的贡献率和NSC收获指数最高（$P<0.05$），见表3。

3 讨　论

3.1 种植密度对夏玉米碳氮积累及转运的影响

玉米籽粒中的氮素主要来源于植株根系的吸收和营养器官的转运，碳水化合物主要来源于植株花后光合同化物的合成和花前营养器官贮存碳水化合物向籽粒的转运[15-16]。增加碳氮物质积累量，提高营养器官碳氮物质向籽粒的转运对玉米实现高产具有重要意义[17]。在6.0万～9.0万株/hm^2时，玉米群体花后氮素积累量随密度的增加先升高后降低；茎秆和鞘的氮素转运量变化趋势与之相似；而叶片氮素转运量、植株氮素转运率和氮素转运量对籽粒的贡献率则随着密度增大呈逐渐上升趋势[18]。然而，张中东等[19]研究认为高密植水平抑制了花后氮素的吸收。本研究结果显示，增加种植密度可显著提高吐丝期和成熟期玉米各器官氮素积累量，但当密度增加至9.0万株/hm^2（D_3）时，籽粒氮素积累量显著下降；密植也可使花前氮素转运量和花后氮素积累量得到提高，但降低了花前氮素转运效率和花前氮素转运对籽粒的贡献率。这说明过高的密植水平不利于玉米籽粒氮素的积累。

陈传永等[20]研究认为，过高的种植密度通过限制叶片光合作用，影响可溶性糖的合成和转运。玉米全株可溶性糖含量随着种植密度的增加呈先升高后降低的趋势，而在6.0万～10.5万株/hm^2时，叶片中可溶性糖含量则随着密植水平的提高而降低，且中密植水平下叶片可溶性糖含量显著高于高密植水平[21-22]。本研究结果显示，随着种植密度的增加，吐丝期茎秆和叶片中以及成熟期籽粒中的NSC先增加后降低，而成熟期茎秆和叶片的NSC则逐渐增加。这说明过高的密植水平不利于籽粒中NSC的积累。花前NSC转运量和花后NSC积累量也均随着种植密度的增加呈现先增加后降低，而花前非结构性碳水化合物的转运效率和对籽粒的贡献率则均呈逐渐下降的趋势。因此，密植玉米群体植株碳氮的积累和转运之间既相互协调又相互制约，适宜的种植密度可以促进碳氮物质向籽粒转运，提高转运效率。

3.2 错株增密对夏玉米碳氮积累及转运的影响

夏玉米在8.25万株/hm^2密植条件下，错株种植方式可以通过提高群体整齐度，增加茎叶夹角，提高光能截获和利用，较对株种植平均增产3.8%～6.1%[23]。双行交错种植方式下夏玉米根系数量和干重提高，茎秆粗壮，群体干物质显著升高[10]；且群体冠层干物质积累量升高12.25%，冠层容纳量升高0.75万株/hm^2，平均增产14.30%[24]。梁忠宇等[25]研究认为在7.5万株/hm^2的密植水平下，扩行缩株的种植方式可显著提高春玉米各器官氮素积累量、转运量及转运效率。卫丽等[8]研究表明，宽窄行双行三角留苗的种植方式可以优化群体中下部冠层叶片光照条件，提高其光合性能及物质生产力。而在黑龙江垄作模式下，大垄双行的种植方式也是通过提高叶片叶绿素含量、光合速率、碳氮代谢关键酶活性等生理指标，促进植株碳氮物质积累[26]。这说明种植方式主要通过改变群体光照条件提高了干物质积累，进而实现增产。

张美微等[11]关于错株增密对产量影响的研究结果也表明，错株种植方式通过优化密植群体冠层结构，提高群体光能截获和利用；在密植条件下错株种植方式可增产10.23%～14.08%，且在8.25万株/hm^2种植密度下采用错株种植方式可获得最高产量水平13 767.77kg/hm^2（2年平均结果）。本研究结果显示，错株种植较对株种植可显著提高植株氮素和NSC积累量，促进花前花后氮素和NSC的积累量，提高花前氮素和NSC转运效率以及二者对籽粒的贡献率。此外，错株种植也增加了氮素和NSC收获指数。因此，本研究中夏玉米在8.25万株/hm^2密植水平下，采用错株种植方式不仅可以提高植株碳氮物质积累，增加花前和花后碳氮物质积累量，还可促进碳氮物质转运，提高碳氮物质转运效率以及其对籽粒的贡献率，获得高产。而玉米植株碳氮积累、转运和利用特征与籽粒发育的关系及其调控机制还有待进一步试验研究。

4 结　论

种植密度和种植方式对夏玉米碳氮物质积累和转运以及氮素和NSC收获指数均有显著影响。密植可以提高植株碳氮物质积累量和转运量，但降

低了转运效率和对籽粒的贡献率，且过高的密植水平（9.0万株/hm^2，D_3）不利于籽粒碳氮物质积累。错株种植（S）方式可显著提高植株碳氮物质积累和转运以及碳氮收获指数。综上，黄淮海地区在8.25万株/hm^2密植水平（D_2）下采用错株种植方式可显著提高夏玉米碳氮物质积累，促进其向籽粒的转运，有利于获得较高的氮素、NSC收获指数和产量。

参考文献 References

[1] 郭瑶，柴强，殷文，范虹．玉米密植光合生理机制及应用途径研究进展[J]．作物学报，2022，48(8)：1871-1883
Guo Y，Chai Q，Yin W，Fan H．Research progress on photosynthetic physiological mechanism and approaches to application of maize close planting [J]．*Acta Agronomica Sinica*，2022，48(8)：1871-1883 (in Chinese)

[2] 刘昕萌，程乙，刘玉文，庞尚水，叶秀芹，卜艳霞，张吉旺，赵斌，任佰朝，任昊，刘鹏．黄淮海区域现代夏玉米品种产量与资源利用效率的差异分析[J]．作物学报，2023，49(5)：1363-1371
Liu X M，Cheng Y，Liu Y W，Pang S S，Ye X Q，Bu Y X，Zhang J W，Zhao B，Ren B Z，Ren H，Liu P．Difference analysis of yield and resource use efficiency of modern summer maize varieties in Huang-Huai-Hai Region[J]．*Acta Agronomica Sinica*，2023，49(5)：1363-1371 (in Chinese)

[3] 徐丽娜，安治良，陈士林，张怀胜，进茜宁，王平喜．种植密度对玉米茎秆强度和穗部性状的影响[J]．河南农业科学，2023，52(8)：11-17
Xu L N，An Z L，Chen S L，Zhang H S，Jin X N，Wang P X．Effect of Planting density on stem strength and ear characters of maize [J]．*Journal of Henan Agricultural Sciences*，2023，52(8)：11-17 (in Chinese)

[4] 王昌亮，张国合，常建智，吴西利，闫丽慧，李彦昌，王芬霞，侯现军，蔡馨燕．黄淮海子粒收获玉米对种植密度的响应[J]．玉米科学，2023，31(4)：99-107
Wang C L，Zhang G H，Chang J Z，Wu X L，Yan L H，Li Y C，Wang F X，Hou X J，Cai X Y．Response to planting density of maize suitable for machine harvesting in Huang-Huai-Hai[J]．*Journal of Maize Sciences*．2023，31(4)：99-107 (in Chinese)

[5] 郑孟静，翟立超，申海平，姚海坡，贾秀领．种植密度对河北夏玉米生理成熟后茎秆抗倒能力及产量的影响[J]．核农学报，2022，36(7)：1434-1445
Zheng M J，Zhai L C，Shen H P，Yao H P，Jia X L．Effects of planting density on stem lodging resistance and grain yield of summer maize after physiological maturity in Hebei [J]．*Journal of Nuclear Agricultural Sciences*．2022，36(7)：1434-1445 (in Chinese)

[6] 任佰朝，李利利，董树亭，刘鹏，赵斌，杨今胜，王丁波，张吉旺．种植密度对不同株高夏玉米品种茎秆性状与抗倒伏能力的影响[J]．作物学报，2016，42(12)：1864-1872
Ren B Z，Li L L，Dong S T，Liu P，Zhao B，Yang J S，Wang D B，Zhang J W．Effects of plant density on stem traits and lodging resistance of summer maize hybrids with different plant heights [J]．*Acta Agronomica Sinica*，2016，42(12)：1864-1872 (in Chinese)

[7] 王敬亚，齐华，梁熠，王晓波，吴亚男，白向历，刘明，孟显华，许晶．种植方式对春玉米光合特性、干物质积累及产量的影响[J]．玉米科学，2009，17(5)：113-115，120
Wang J Y，Qi H，Liang Y，Wang X B，Wu Y N，Bai X L，Liu M，Meng X H，Xu J．Effects of different planting patterns on the photosynthesis capacity dry matter accumulation and yield of spring maize[J]．*Journal of Maize Sciences*，2009，17(5)：113-115，120 (in Chinese)

[8] 卫丽，熊友才，马超，张慧琴，邵阳，李朴芳，程正国，王同朝．不同群体结构夏玉米灌浆期光合特征和产量变化[J]．生态学报，2011，31(9)：2524-2531
Wei L，Xiong Y C，Ma C，Zhang H Q，Shao Y，Li P F，Cheng Z G，Wang T C．Photosynthetic characterization and yield of summer corn (*Zea mays* L) during grain filling stage under different planting pattern and population densities[J]．*Acta Ecologica Sinica*，2011，31(9)：2524-2531 (in Chinese)

[9] 张永科，王立祥．玉米蜂巢式高产栽培技术研究应用[J]．干旱地区农业研究，2009，27(5)：59-64
Zhang Y K，Wang L X．The research and utilization of maize cellular planting technique[J]．*Agricultural Research in The Arid Areas*，2009，27(5)：59-64 (in Chinese)

[10] 李艳华，张鹏，吴国良，李金玲，毕建杰，刘建栋．"双行交错"种植方式玉米干物质积累动态变化的研究[J]．山东农业科学，2011，43(6)：35-38
Li Y H，Zhang P，Wu G L，Li J L，Bi J J，Liu J D．Research on dynamic variation of dry matter accumulation in maize cultivated by "double-row interlaced planting" method[J]．*Shandong Agricultural Sciences*，2011，43(6)：35-38 (in Chinese)

[11] 张美微，李川，张盼盼，牛军，郭涵潇，何佳雯，刘京宝，乔江方．错株密植对夏玉米冠层特性和产量的影响[J]．中国农业大学学报，2023，28(5)：34-43
Zhang M W，Li C，Zhang P P，Niu J，Guo H X，He J W，Liu J B，Qiao J F．Effects of staggered planting and close planting on canopy characteristic and yield of summer maize [J]．*Journal of China Agricultural University*，2023，28(5)：34-43 (in Chinese)

[12] 李荣发，刘鹏，杨清龙，任昊，董树亭，张吉旺，赵斌．玉米密植群体下部叶片衰老对植株碳氮分配与产量形成的影响[J]．作物学报，2018，44(7)：1032-1042
Li R F，Liu P，Yang Q L，Ren H，Dong S T，Zhang J W，Zhao B．Effects of lower leaf senescence on carbon and nitrogen distribution and yield formation in maize (*Zea mays* L) with high planting density[J]．*Acta Agronomica Sinica*，2018，44(7)：1032-1042 (in Chinese)

[13] 李朝英，郑路．流动分析仪同时快速测定植物全氮、全磷含量的方法改进[J]．中国土壤与肥料，2021(2)：336-342
Li Z Y，Zheng L．Improvement of simultaneous and rapid determination of total nitrogen and total phosphorus in plants by flow analyzer[J]．*Soil and Fertilizer Sciences in China*，2021(2)：336-342 (in Chinese)

[14] 吴雅薇，蒲玮，赵波，魏桂，孔凡磊，袁继超．不同耐低氮性玉米品种的花后碳氮积累与转运特征[J]．作物学报，2021，47(5)：915-928
Wu Y W，Pu W，Zhao B，Wei G，Kong F L，Yuan J C．Characteristics of post-anthesis carbon and nitrogen accumulation and translocation in maize cultivars with different low nitrogen tolerance [J]．*Acta Agronomica Sinica*，2021，47(5)：915-928 (in Chinese)

[15] Plénet D，Lemaire G．Relationships between dynamics of nitrogen uptake and dry matter accumulation in maize crops．Determination of critical N concentration[J]．*Plant and Soil*，1999，216(1-2)：65-82

[16] Ning P，Yang L，Li C J，Fritschi F B．Post-silking carbon partitioning under nitrogen deficiency revealed sink limitation of grain yield in maize [J]．*Journal of Experimental Botany*，2018，69(7)：1707-1719

[17] 王瑞，李向岭，郭栋，王新兵，马玮，李从锋，赵明，周宝元．增施氮肥对

夏玉米花后高温胁迫下籽粒碳氮代谢的影响[J]. 作物学报，2023，49(12):3342-3351

Wang R, Li X L, Guo D, Wang X B, Ma W, Li C F, Zhao M, Zhou B Y. Effects of application nitrogen on carbon and nitrogen metabolism of summer maize grain under post-silking heat stress[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2023, 49(12):3342-3351 (in Chinese)

[18] 李龙. 肥料类型和种植密度对玉米产量和养分积累转运的影响[D]. 扬州:扬州大学，2018

Li L. Effects of fertilizer species and plant density on nutrient accumulation and translocation and grain yield of spring maize [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2018 (in Chinese)

[19] 张中东，郭正宇，宫帅，陈永欣. 新老玉米品种花粒期干物质及氮素积累转运机制的差异分析[J]. 华北农学报，2017，32(6)：182-191

Zhang Z D, Guo Z Y, Gong S, Chen Y X. Difference analysis of dry matter and nitrogen accumulation and translocation mechanism of new and old maize varieties flowering to maturity stage[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2017, 32(6)：182-191 (in Chinese)

[20] 陈传永，侯海鹏，李强，朱平，张振勇，董志强，赵明. 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, Zhu P, Zhang Z Y, Dong Z Q, Zhao M. 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 (in Chinese)

[21] 刘春晓，陈凯，董瑞，张秀芝，刘铁山，何春梅，汪黎明，高新学，刘玉敬，刘强，陈凯. 不同种植密度对玉米叶面积指数、干物质积累及产量的影响[J]. 山东农业科学，2017，49(2):36-39

Liu C X, Chen K, Dong R, Zhang X Z, Liu T S, He C M, Wang L M, Gao X X, Liu Y J, Liu Q, Chen K. Effects of different planting densities on leaf area index, dry matter accumulation and yield of maize [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2017, 49(2):36-39 (in Chinese)

[22] 董伟欣，韩立杰，张月辰. 不同密度和行距对玉米生长特性、产量和籽粒营养成分的影响[J]. 东北农业大学学报，2020，51(2)：26-34

Dong W X, Han L J, Zhang Y C. Effect of different densities and row spacings on growth characteristics, yield and grain nutrients of maize (*Zea mays* L)[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2020, 51(2): 26-34 (in Chinese)

[23] 张春雨，白晶，丁相鹏，张吉旺，刘鹏，任佰朝，赵斌. 错株增密种植对夏玉米光合特性及产量的影响[J]. 中国农业科学，2020，53(19):3928-3941

Zhang C Y, Bai J, Ding X P, Zhang J W, Liu P, Ren B Z, Zhao B. Effects of staggered planting with increased density on the photosynthetic characteristics and yield of summer maize [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(19):3928-3941 (in Chinese)

[24] 孙雪芳. 玉米耕层冠层协同优化对密植早衰的调控机制及其模式构建[D]. 北京：中国农业大学，2018

Sun X F. Regulatory mechanism of synergistic optimization of maize topsoil structure and canopy on premature senescence caused by close planting and the derived cultivation pattern construction [D]. Beijing: China Agricultural University, 2018 (in Chinese)

[25] 梁忠宇，张玉芹，杨恒山，邰继承，杨伟鹏. 扩行缩株种植对春玉米氮素积累、转运及产量的影响[J]. 内蒙古民族大学学报:自然科学版，2021，36(4)：345-349

Liang Z Y, Zhang Y Q, Yang H S, Tai J C, Yang W P. Effects of expanding line spacing and shrinking row spacing on the accumulation, translocation and yield of nitrogen in spring maize[J]. *Journal of Inner Mongolia Minzu University : Natural Sciences*, 2021, 36(4): 345-349 (in Chinese)

[26] 葛选良，钱春荣，李梁，姜宇博，宫秀杰，吕国依. 不同栽培模式玉米群体光合及碳氮代谢特性研究[J]. 玉米科学，2022，30(2)：126-131

Ge X L, Qian C R, Li L, Jiang Y B, Gong X J, Lv G Y. Studies on characteristics of photosynthesis and carbon and nitrogen metabolism in maize of different cultivation patterns [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2022, 30(2): 126-131 (in Chinese)

责任编辑：吕晓梅

第一作者简介：张美微，博士，河南省农业科学院粮食作物研究所助理研究员。主要从事玉米栽培生理研究与技术示范推广工作。主持或参与了国家重点研发计划(2017YFD0301102-1，2018YFD0300702，2018YFD0200605-3)，农业部公益性行业科研专项(201203033)，河南省科技攻关(22210211028，242102110165)等10余项。在 *Crop Science*、*Journal of Cereal Science*、《生态学报》《植物营养与肥料学报》《核农学报》《玉米科学》等期刊发表20余篇学术论文，参编著作4部。

通讯作者简介：乔江方，博士，河南省农业科学院粮食作物研究所副研究员，研究室主任。郑州大学、西北农林科技大学硕士研究生导师。主要研究领域为：玉米生理生态和高效栽培。获河南省科技进步奖三等奖1项。先后主持国家自然科学基金青年基金、国家重点研发计划项目课题、农业部公益性行业子专项、省财政支持项目、省科技厅重点攻关以及基础前沿类项目20余项。发表学术论文30余篇，主编或参编专著8部。