

傅鹏霄, 王珏, 李广浩, 等. 不同栽培模式对江苏省夏玉米产量和氮素利用的影响[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(5): 1151-1159.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2021.05.009

不同栽培模式对江苏省夏玉米产量和氮素利用的影响

傅鹏霄, 王珏, 李广浩, 陆卫平, 陆大雷

(扬州大学农学院, 江苏省作物遗传生理重点实验室/江苏省作物栽培生理重点实验室/江苏省粮食作物现代产业技术协同创新中心, 江苏 扬州 225009)

摘要: 为了明确不同栽培模式下江苏省夏玉米产量和氮素利用率的变化, 为江苏省夏玉米高产高效轻简生产提供理论依据, 以江玉 877(江苏省主推品种)为材料, 研究了夏玉米籽粒产量、干物质和氮素积累转运在 4 种栽培模式[基础地力水平(CK)、农户栽培模式(FL)、高产高效栽培模式(HH)、超高产栽培模式(SH)]间的差异。结果表明, 栽培模式对夏玉米产量和氮素吸收利用有显著影响。与 FL 模式相比, HH、SH 模式 3 年平均千粒质量分别增加 4.3% 和 0.8%, 产量分别增加 20.6% 和 23.6%, 吐丝期叶面积指数分别增加 15.6% 和 20.2%, 干物质积累量分别增加 26.3% 和 28.1%, 花前干物质积累量对籽粒产量贡献率分别增加 6.6% 和 2.4%, 氮素积累量分别增加 13.9% 和 31.9%, 氮素转运量分别增加了 20.5% 和 39.2%。不同模式下, HH 模式更有利于提高夏玉米氮肥偏生产力、氮肥农学利用效率和氮素利用率。SH 模式较 FL 模式氮素利用率增加。在江苏省夏玉米生产中, 通过合理增加种植密度, 肥料改普通复合肥基施+拔节期撒施氮肥为缓控释肥一次性基施, 种肥同播, 可达到节省肥料、增产的目标, 实现绿色优质高产高效轻简生产。

关键词: 夏玉米; 种植模式; 产量; 干物质; 氮素利用率

中图分类号: S513.047 文献标识码: A 文章编号: 1000-4440(2021)05-1151-09

Effects of different cultivation patterns on the yield and nitrogen utilization of summer maize in Jiangsu province

FU Peng-xiao, WANG Jue, LI Guang-hao, LU Wei-ping, LU Da-lei

(*Jiangsu Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology/Jiangsu Key Laboratory of Crop Cultivation and Physiology/Co-Innovation Center for Modern Production Technology of Grain Crops, College of Agriculture, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China*)

Abstract: The effects of different cultivation patterns on yield and nitrogen use efficiency of summer maize in Jiangsu province were charified to provide theoretical basis for high yield, high efficiency and simple production of summer maize. The differences in grain yield, accumulation and transport of dry matter and nitrogen under four cultivation modes [basic soil fertility level (CK), farmer level (FL), high yield and high efficiency level (HH) and super-high yield level (SH)] were compared using Jiangyu 877 (one of the main promoted variety in Jiangsu province) as materials. Results showed that planting patterns had significant effects on the yield and nitrogen absorption and utilization of summer maize. Compared with

FL cultivation pattern, 1000-grain weight increased by 4.3% and 0.8% under HH and SH cultivation patterns, yield increased by 20.6% and 23.6%, leaf area index increased by 15.6% and 20.2% at silking stage, dry matter accumulation increased by 26.3% and 28.1%, the contribution rate of pre-anthesis dry matter accumulation to grain yield increased by 6.6% and 2.4%, nitrogen accumulation by 13.9% and 31.9%, nitrogen transport increased by

收稿日期: 2021-01-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0300109); 国家自然科学基金项目(31771709); 江苏省现代农业产业技术体系项目[JATS(2020)444]; 江苏省作物学优势学科项目

作者简介: 傅鹏霄(1996-), 男, 江苏南京人, 硕士研究生, 主要从事玉米栽培生理研究。(E-mail) 504004855@qq.com

通讯作者: 陆大雷, (E-mail) dllu@yzu.edu.cn

20.5% and 39.2%, respectively. Under different modes, HH mode is more beneficial to improve nitrogen partial productivity, nitrogen agronomic utilization efficiency and nitrogen utilization rate. Compared with that in FL treatment, the nitrogen utilization rate in SH treatment increased. In the production of summer corn in Jiangsu province, the goal of saving fertilizer and increasing yield, and green, high-quality, high-yield, high-efficiency and simple production can be achieved by increasing the planting density reasonably, changing fertilizer into slow and controlled release fertilizer, applying fertilizer and sowing seeds at the same time.

Key words: summer maize; planting pattern; yield; dry matter; nitrogen use efficiency

江苏省畜禽养殖业发达,年需玉米近 1×10^7 t,但玉米年产量仅 $2.5 \times 10^6 \sim 3.0 \times 10^6$ t,供需缺口较大^[1]。前人研究结果表明,不同栽培措施中,种植密度与氮素施用量是影响玉米产量和养分吸收利用的关键因素^[2],适当提高种植密度可显著提升玉米光能利用效率,同时在一定程度上提高氮肥的利用效率,实现玉米高产^[3-4]。裴建峰等^[5]认为高密度下等行距种植能够改善群体内小气候,提高中下部的光能截获率,增强抗逆性。中国玉米的氮素利用效率仅仅是 26% 左右,远低于氮素利用效率为 33% 的国际平均水平^[6]。江苏省实际大田生产中,当地农户玉米种植模式的产量与效率相对比较高,然而还有很大的提升空间。因此,制定不同栽培模式,探究从基础地力栽培模式到当地农户栽培模式,以及从农户栽培模式到高产高效及超高产栽培模式下产量与效率的变化规律,进一步寻求在农户栽培模式基础上产量、效率双增长的栽培方式与技术途径是有意义且有必要的。

江苏省夏季高温、病虫害、干旱、涝渍、台风等灾害频繁^[7],温度和降水资源丰富,生产中主要限制因素为种植密度不足,肥料施用一般为复合肥(N、 P_2O_5 、 K_2O 含量分别为 15%、15%、15%)基施。然而江苏省肥料施用存在的主要问题是穗肥(主要指氮肥)的追施,生产中多为靠雨撒施,由于玉米生长季温度较高,撒施容易造成铵态氮的挥发,如果撒施后

降雨量过多也会造成硝态氮的淋溶^[8]。在国家大面积高产创建活动中发现,合理增加密度是高产的主要栽培因子。同时缓控释肥结合机械化播种实现种肥同播是实现轻简施肥的重要途径。合理增加密度结合轻简施肥是实现玉米生产绿色高质高效的关键。江苏省夏玉米实际生产中,农户实际种植模式与高产高效栽培模式间产量与效率差异较大,生产中如何进一步增产增效成为急需解决的问题,且江苏省夏玉米增产潜力较大,生产上开展小面积玉米超高产试验,可以进一步发掘玉米高产潜力,因此本试验设置代表不同生产水平的 4 种不同栽培模式,研究密度与肥料运筹相结合的栽培模式对夏玉米籽粒产量以及养分积累、转运和利用的影响,以期对夏玉米高产高效轻简栽培提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地点概况与试验设计

试验在江苏省睢宁县双沟镇试验基地进行。试验点的基础地力状况见表 1。选用目前江苏省主推的高新玉米品种江玉 877 作为试验试材。3 种试验肥料分别为缓释肥(N、 P_2O_5 、 K_2O 含量分别为 27%、9%、9%、常规复合肥(N、 P_2O_5 、 K_2O 含量分别为 15%、15%、15%)和尿素(N46%),均购自苏州中东农业化肥科技股份有限公司。

表 1 2017–2019 年基础地力状况

Table 1 Basic soil fertility before sowing in 2017–2019

年份	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	速效氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
2017	14.2	1.4	82.5	15.9	68.9
2018	13.8	1.5	79.6	14.8	69.1
2019	14.6	1.5	81.2	14.9	77.1

试验播种方案整体采用大区域布置方式设计,小区面积 $1\,440\text{ m}^2$ ($120\text{ m} \times 12\text{ m}$)。2017 年 6 月 24

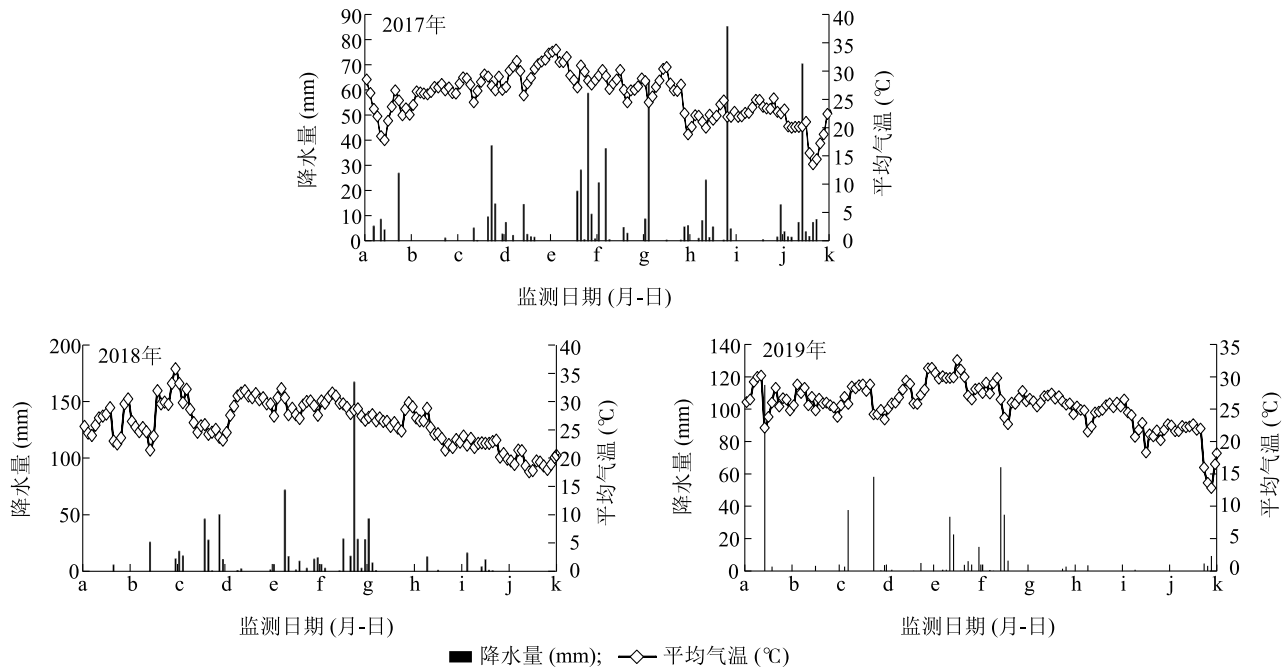
日播种,10 月 16 日收获;2018 年 6 月 15 日播种,10 月 7 日收获;2019 年 6 月 17 日播种,10 月 4 日收

获。均采用农哈哈 2BYFSF-4 仿型玉米播种机一次性种肥同播,等行距(60 cm)种植。设置 4 个处理:基础地力水平(CK),即不施肥对照;农户水平(FL),即江苏省农户普遍习惯的栽培模式;高产高效水平(HH),即基于高产创建经验,在农户水平上优化管理模式,调整密肥结构;超高产水平(SH),代表江苏省玉米的高产潜力。CK、FL、HH 和 SH 处理的株距分别为 28 cm、28 cm、20 cm 以及 18 cm,基础密度分别为 1 hm^2 59 554 株、59 554 株、83 375 株以及 92 638 株,施肥方式分别为不施肥、常规复合肥一次性基施 750 kg/hm^2 + 拔节期撒施尿素 480 kg/hm^2 (N、 P_2O_5 、 K_2O 施肥量分别为 333.3 kg/hm^2 、 112.5 kg/hm^2 、 112.5 kg/hm^2)、缓释肥一次性基施 750

kg/hm^2 (N、 P_2O_5 、 K_2O 施肥量分别为 202.5 kg/hm^2 、 67.5 kg/hm^2 、 67.5 kg/hm^2)、缓释肥一次性基施 750 kg/hm^2 + 大喇叭口期追施尿素 240 kg/hm^2 (N、 P_2O_5 、 K_2O 施肥量分别为 312.9 kg/hm^2 、 67.5 kg/hm^2 、 67.5 kg/hm^2)。

1.2 气象概况

试验期间降水及天气温度变化见图 1,2017 年降水主要集中于玉米生育前期,导致玉米花期缺水,且遭受高温干旱胁迫;2018 年降水主要集中于玉米生育中后期,玉米生育前期严重缺水;2019 年全生育期降水平均且充足。3 年的平均气温基本一致,其中 2017 年 8 月份的平均气温最高。



a: 06-01; b: 06-14; c: 06-27; d: 07-10; e: 07-23; f: 08-05; g: 08-18; h: 08-31; i: 09-13; j: 09-26; k: 10-09。

图 1 试验点 3 年气象数据

Fig.1 Climate during plant growth in the three years

1.3 测定项目及方法

1.3.1 籽粒产量及其构成 成熟期随机采收各小区中间 6 行(长 20.0 m,宽 3.6 m,总面积 72 m^2 ,3 次重复)所有玉米,去除苞叶后晒干脱粒,称质量,计算籽粒产量。另取 10 株进行考种,测定每穗粒数及千粒质量。

1.3.2 干物质积累 在拔节期、开花期、花后 20 d 和成熟期,各处理分别取长势均匀一致有代表性的 3 株地上部分,按不同器官(拔节期:叶片、茎鞘;开

花期:叶片、茎鞘;花后 20 d:叶片、茎鞘、苞叶、穗轴、籽粒;成熟期:叶片、茎鞘、苞叶、穗轴、籽粒)分开, $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 杀青 30 min, $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒质量后称质量。

1.3.3 叶面积指数(LAI) 于玉米拔节期、开花期、花后 20 d,测量取样的 3 株叶面积,采用长宽系数法计算叶面积。叶面积=叶长×叶宽×0.75;叶面积指数(LAI)=该土地面积上的总叶面积/土地面积。粒叶比(g/dm^2)=单位面积粒质量/叶面积。

1.3.4 氮素含量测定 取粉碎后样品,用全自动凯氏

定氮仪(Kjeltec 8400, FOSS, Denmark)测定氮含量。

1.4 参数测定

干物质(氮素)转运量(kg/hm^2)=开花期干物质(氮素)质量-成熟期干物质(氮素)质量;干物质(氮素)转运率=干物质(氮素)转运量/开花期干物质(氮素)质量 $\times 100\%$;干物质(氮素)对籽粒贡献率=干物质(氮素)转运量/成熟期籽粒干物质(氮素)积累量 $\times 100\%$;氮素利用率(RE)=(施氮区氮素吸收量-空白区氮素吸收量)/施氮量 $\times 100\%$;氮素偏生产力(PFL)=施氮区产量/施氮量 $\times 100$;氮素农学效率(AE)=(施氮区产量-空白区产量)/施氮量;收入(元, 1 hm^2)=产量(kg/hm^2) \times 玉米单价(元, 1 kg)。

投入(元, 1 hm^2)=种子成本+肥料成本+其他成本。其他成本(元, 1 hm^2)=整耕地成本+播种成本+田间管理成本+秸秆处理成本+农药、除草剂、化控等成本+人力和机械成本+租地成本。净收益

(元, 1 hm^2)=收入(元, 1 hm^2)-总成本(元, 1 hm^2)。

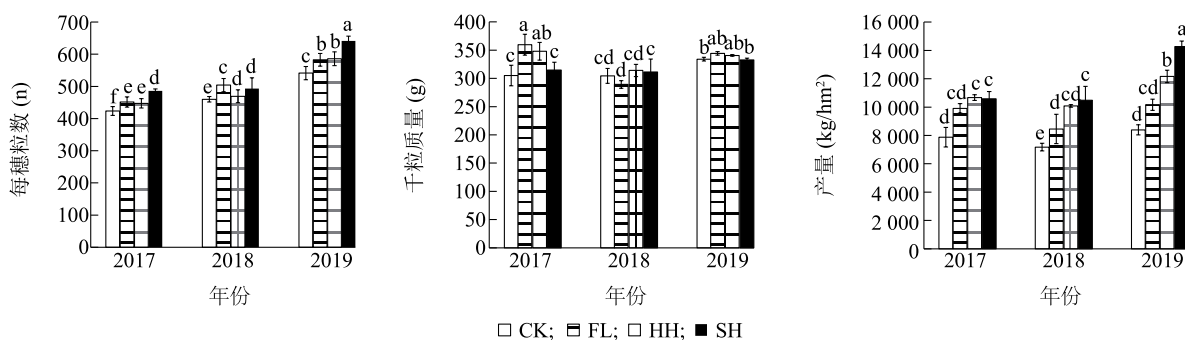
1.5 数据分析方法

采用 DPS 7.05 软件进行统计分析,采用 Microsoft Excel 2016 作图。

2 结果与分析

2.1 栽培模式对夏玉米产量及其构成因素的影响

不同栽培模式对江苏省夏季玉米籽粒的产量及其构成都有显著的影响(图2)。年度和不同处理对夏玉米的穗粒数有显著影响,不同处理对千粒质量影响较小,而密度的增加进一步增加了籽粒产量,表明合理增加密度改善群体结构(图3)可以进一步提高籽粒产量。与 FL 处理相比,HH 处理以及 SH 处理籽粒产量分别增加 7.6%~33.7% (20.6%) 和 6.8%~40.4% (23.6%)。产量均在 SH 处理下达到最大,3 年趋势基本表现一致。



CK: 常规对照; FL: 农户水平; HH: 高产高效水平; SH: 超高产水平。不同字母表示不同处理间在 0.05 水平上差异显著。

图2 栽培模式对夏玉米籽粒产量的影响

Fig.2 Effects of cultivation patterns on grain yield of summer maize

2.2 栽培模式对夏玉米干物质积累的影响

不同栽培模式对夏玉米干物质积累有显著影响。合理的密度及其施肥处理方法显著地增加了植株在玉米花前和花后干物质积累,且年度间差异显著(表2)。与 FL 处理相比,SH 处理以及 HH 处理成熟期干物质积累量具有显著差异,3 年分别增加了 14.3%~38.3% (26.3%) 和 16.2%~39.9% (28.1%)。干物质积累量表现为 SH>HH>FL>CK。

2.3 栽培模式对夏玉米干物质转运的影响

不同栽培模式对夏玉米营养器官花前干物质转运有显著影响(表3)。茎+鞘的干物质转运量,随密度与肥料的增加而增加。叶片的干物质转运量处

理间均无显著差异。由表3可知,夏玉米干物质转运对籽粒的贡献率处理间无显著差异。而干物质总转运量以及转运率均在 SH 处理下达到最大值。产量形成主要归因于开花后干物质的积累和开花前干物质的运输,干物质运输的适当增加可促进产量的形成。

2.4 栽培模式对夏玉米氮素积累的影响

不同栽培模式对夏玉米花前与花后氮素积累有显著影响,且年份间、处理间差异显著(图4)。与 FL 相比,HH 处理以及 SH 处理成熟期氮素积累 3 年分别增加 6.5%~21.2% (13.9%) 和 17.6%~46.1% (31.9%)。

表 2 栽培模式对夏玉米不同生育期干物质积累量的影响

Table 2 Effects of cultivation patterns on dry matter accumulation of summer maize at different growth stages

年份	栽培模式	拔节期积累量 (kg/hm ²)	开花期积累量 (kg/hm ²)	花后 20 d 积累量 (kg/hm ²)	成熟期积累量 (kg/hm ²)	收获指数
2017	CK	641.3b	7 000.3b	11 670.6b	17 293.2b	0.59a
	FL	659.9b	7 115.6b	11 981.5b	17 647.9b	0.59a
	HH	1 185.7a	8 290.9a	14 383.7a	20 171.9a	0.58a
	SH	1 082.5a	8 446.2a	14 477.3a	20 512.1a	0.58a
2018	CK	710.0b	6 363.8b	10 778.8b	15 730.4b	0.59a
	FL	967.7b	6 458.2b	11 088.6b	15 932.6b	0.59a
	HH	1 459.0a	9 348.0a	15 160.5a	22 049.9a	0.57a
	SH	1 507.0a	9 095.3a	15 513.4a	22 294.0a	0.59a
2019	CK	783.6c	6 075.1d	12 446.3b	10 741.4d	0.43a
	FL	925.5bc	8 089.8c	13 906.9b	14 353.4c	0.43a
	HH	1 077.9ab	9 685.2b	16 731.5a	18 101.3b	0.46a
	SH	1 133.6a	10 937.0a	17 058.7a	19 646.5a	0.44a

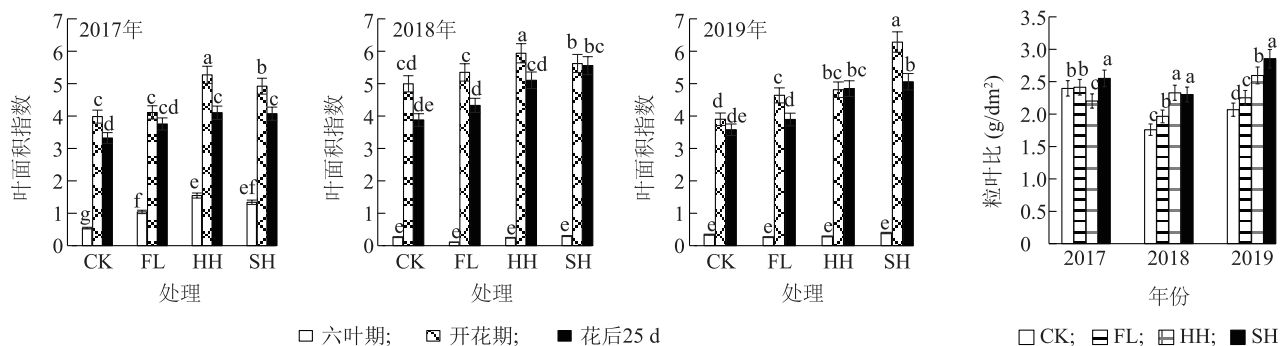
CK、FL、HH 和 SH 见图 2 注。同列不同字母表示不同处理间在 0.05 水平上差异显著。

表 3 栽培模式对夏玉米营养器官花前干物质转运的影响

Table 3 Effects of cultivation patterns on pre-anthesis dry matter transport ation in vegetative organs of summer maize

年度	栽培模式	茎+鞘转运量 (kg/hm ²)	叶片转运量 (kg/hm ²)	总转运量 (kg/hm ²)	转运率 (%)	贡献率 (%)
2017	CK	807.1b	336.1a	1 143.2b	16.3b	11.9a
	FL	1 013.2b	453.6a	1 467.6ab	19.9ab	15.0a
	HH	1 406.3a	446.6a	1 852.9a	22.2a	15.9a
	SH	1 357.4a	418.4a	1 775.4a	21.5a	14.3a
2018	CK	679.5b	442.0b	1 121.1b	17.6ab	12.7ab
	FL	499.6c	817.5ab	1 316.5b	20.3ab	14.7ab
	HH	611.7b	800.5ab	1 412.0b	15.1a	12.1b
	SH	982.8a	1 284.1a	2 266.2a	24.7a	17.6a
2019	CK	587.9b	285.9b	873.5b	13.9a	9.8a
	FL	549.1b	365.0b	914.8b	13.0a	11.4a
	HH	929.1a	260.7b	1 190.7b	11.7a	10.0a
	SH	1 086.1a	732.6a	1 818.9a	15.3a	12.6a

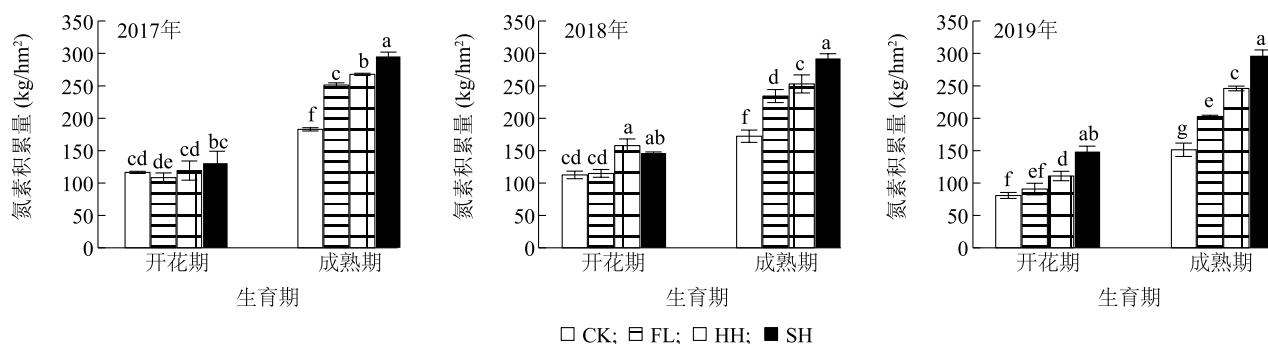
CK、FL、HH 和 SH 见图 2 注。同列不同字母表示不同处理间在 0.05 水平上差异显著。



CK、FL、HH 和 SH 见图 2 注。不同字母表示不同处理间在 0.05 水平上差异显著。

图 3 栽培模式对夏玉米叶面积指数 (LAI) 和粒叶比的影响

Fig.3 Effects of cultivation patterns on leaf area index and grain-leaf ratio of summer maize



CK、FL、HH 和 SH 见图 2 注。不同字母表示不同处理间在 0.05 水平上差异显著。

图 4 栽培模式对夏玉米氮素积累的影响

Fig.4 Effects of cultivation patterns on nitrogen accumulation of summer maize

2.5 栽培模式对夏玉米氮素转运的影响

不同栽培模式对玉米花前氮素转运量有显著影响,转运率和对籽粒的贡献率处理间均无显著差异(表 4)。合理增加密度与氮肥显著增加茎+鞘、叶片和总氮素转运量,且 SH 处理增幅最高,与 FL 处理相比增加 29.5%~48.9% (39.2%)。由表 4 可知,氮素总转运量 3 年处理间均呈现 SH>HH>FL>CK。

表 4 栽培模式对夏玉米营养器官花前氮素转运的影响

Table 4 Effects of cultivation patterns on pre-anthesis nitrogen transport ation in vegetative organs of summer maize

年度	栽培模式	茎+鞘氮素 转运量 (kg/hm ²)	叶片氮素 转运量 (kg/hm ²)	总转运量 (kg/hm ²)	转运率 (%)	贡献率 (%)
2017	CK	35.8c	30.6a	66.4a	57.0a	55.7a
	FL	40.5b	17.8b	58.3a	51.5a	49.7a
	HH	52.4a	17.5b	70.0a	58.2a	48.5a
	SH	51.4a	24.1ab	75.5a	57.1a	51.1a
2018	CK	32.9bc	21.7c	54.7b	54.3a	50.2b
	FL	27.8c	33.7bc	61.6b	57.2a	57.8ab
	HH	39.9ab	51.1a	91.1a	59.2a	62.6a
	SH	49.9a	41.2ab	91.2a	62.2a	60.4ab
2019	CK	15.4b	26.6b	42.1b	52.1b	45.4a
	FL	20.3b	33.8b	54.1b	59.3a	60.5a
	HH	19.4b	28.3b	47.8b	43.1c	43.4a
	SH	36.6a	44.0a	80.6a	54.2ab	51.9a

CK、FL、HH 和 SH 见图 2 注。同列不同字母表示不同处理间在 0.05 水平上差异显著。

2.6 栽培模式对夏玉米氮素利用率的影响

不同栽培模式对夏玉米氮素偏生产力、氮素农学效率以及氮素利用率均有显著影响(表 5)。与 FL 处理相比,江玉 877 在 HH、SH 处理下氮素偏生

产力、氮素农学效率和利用率显著提高,SH 处理较 FL 处理氮素利用率增加了 75.1%~199.4% (137.3%)。随着种植密度的增加和施氮量的减少,氮素偏生产力、氮素农学效率和利用效率 3 年均表现为 HH>SH>FL。

表 5 栽培模式对夏玉米氮素利用率的影响

Table 5 Effects of cultivation patterns on nitrogen use efficiency of summer maize

年份	栽培模式	素偏生产力	氮肥农学效率	氮肥利用率 (%)
2017	CK	—	—	—
	FL	29.7b	6.1c	20.5b
	HH	52.6a	13.8b	41.5a
	SH	33.8c	25.2a	35.9a
2018	CK	—	—	—
	FL	25.3c	5.8c	18.5b
	HH	49.7a	15.1a	39.5a
	SH	32.9b	10.5b	38.4a
2019	CK	—	—	—
	FL	30.5c	5.3b	15.5b
	HH	60.0a	18.6a	46.7a
	SH	45.6b	18.8a	46.4a

CK、FL、HH 和 SH 见图 2 注。同列不同字母表示不同处理间在 0.05 水平上差异显著。

2.7 栽培模式对夏玉米经济效益的影响

江苏省玉米种植主要成本有整地、耕地、种子、肥料、农药、收获和其他田间用工成本,总成本约为 1 hm² 10 159.5~12 720.0 元(表 6)。与 FL 处理相比,江玉 877 在 HH、SH 处理下收入分别增加了 7.6%~19.7% (13.7%) 和 6.8%~40.4% (23.6%)。种植密度和施肥量的增加,提高了成本,但是显著增加了净收益。

表 6 不同栽培模式下夏玉米经济效益分析

Table 6 Economic benefit analysis of summer maize under different cultivation patterns

年份	栽培模式	种子成本 (元, 1 hm ²)	肥料成本 (元, 1 hm ²)	其他成本 (元, 1 hm ²)	总成本 (元, 1 hm ²)	收入 (元, 1 hm ²)	净收益 (元, 1 hm ²)
2017	CK	709.5	/	9 450	10 159.5	13 389.0	3 229.5
	FL	709.5	2 460.0	9 450	12 619.5	16 848.0	4 228.5
	HH	993.0	1 687.5	9 450	12 130.5	18 141.0	6 010.5
	SH	1 102.5	2 167.5	9 450	12 720.0	17 997.0	5 277.0
2018	CK	709.5	/	9 450	10 159.5	12 196.5	2 037.0
	FL	709.5	2 460.0	9 450	12 619.5	14 539.5	1 920.0
	HH	993.0	1 687.5	9 450	12 130.5	17 140.5	5 010.0
	SH	1 102.5	2 167.5	9 450	12 720.0	17 832.0	5 112.0
2019	CK	709.5	/	9 450	10 159.5	14 439.0	3 679.5
	FL	709.5	2 460.0	9 450	12 619.5	17 485.5	4 866.0
	HH	993.0	1 687.5	9 450	12 130.5	20 922.0	8 791.5
	SH	1 102.5	2 167.5	9 450	12 720.0	24 553.5	11 833.5

CK、FL、HH 和 SH 见图 2 注。

2.8 不同种植模式下夏玉米产量与各指标之间的相关性

表 7 显示,产量与穗粒数、干物质积累量、氮素积累量以及氮素转运量都呈显著正相关关系,与穗

数、粒叶比呈极显著正相关关系,表明生产上可以通过控制合理的肥料运筹来提高玉米干物质积累量和氮素转运量,进而满足农作物的增产需求,也就是通过种植措施增加穗粒数来提高籽粒产量。

表 7 3 年夏玉米产量与各指标之间的相关性 ($n=12$)Table 7 Correlation analysis between maize yield and various indicators in three years ($n=12$)

	产量	穗数	穗粒数	千粒质量	粒叶比	干物质积累量	干物质转运量	氮素积累量	氮素转运量
产量	1.000								
穗数	0.959 **	1.000							
穗粒数	0.943 *	0.811	1.000						
千粒质量	0.765	0.551	0.934 *	1.000					
粒叶比	0.997 **	0.975 **	0.921 *	0.723	1.000				
干物质积累量	0.879 *	0.978 **	0.675	0.368	0.908 *	1.000			
干物质转运量	0.835	0.673	0.916 *	0.917 *	0.794	0.512	1.000		
氮素积累量	0.910 *	0.986 **	0.720	0.434	0.930 *	0.988 **	0.614	1.000	
氮素转运量	0.881 *	0.979 **	0.676	0.369	0.909 *	1.000 **	0.518	0.989 **	1.000

3 讨论

玉米生育过程中,种植密度、肥料使用量和肥料施用时期等均对籽粒灌浆产生显著影响^[9-10]。但是,密度过高会导致植株冠层垛叠,个体之间竞争加剧,群体均匀性降低以及倒伏风险增加^[11-13],从而限制了产量潜力。解决上述问题的途径除了培育新

品种以优化群体结构外,调整施肥量及施肥时期也是有效的栽培措施^[14-18]。适当的施肥量和施肥期的调整可以有效地减少个体竞争,提高群体均匀性并实现高产^[15]。研究结果表明氮肥和种植密度存在显著的互作效应^[19]。高产的形成主要是由于种植密度的合理提高和施肥方式的改良(如改喷施到深施肥料、改多次施肥为缓控肥一次性施用等)以

改善氮素的影响,提高氮肥利用效率。本研究中,与传统农户种植模式相比,高产高效以及超高产种植模式下密度分别增加 39.9% 和 55.6%,施氮量分别减少了 39.2% 和 6.1%,产量分别提高了 7.6%~33.7% (20.6%) 和 6.8%~40.4% (23.6%);超高产种植模式与农户种植模式相比,氮素利用率提高了 4.8%~51.6% (28.2%),表明在合理的种植密度允许范围内,适当增加密度和优化群体结构可以增加夏玉米的产量。3 年研究结果表明,籽粒产量均在超高产种植模式下达到最高。

施氮可以显著促进茎和叶的发育,从而增加玉米中干物质的积累^[20-24]。群体干物质积累量增加是玉米单产增加的基础,并受到经济系数的影响。种植密度的增加显著增加了种群的干物质积累,但是在种植处于高密度状态下,每株植物的干物质积累趋于减少,从而限制了种群的干物质积累显著增加^[25]。干物质的积累,特别是开花后的积累,是获得高产的重要基础^[26]。前人的研究结果表明,高产夏玉米的花后干物质积累量占总生育期的 50%~60%^[27]。籽粒灌浆主要是指来自于花前养分的累积以及对花后养分的吸收和运输^[12-13]。本试验中,与农户栽培模式相比,高产高效以及超高产栽培模式成熟期干物质积累量分别增加 14.3%~38.3% (26.3%) 和 16.2%~39.9% (28.1%),进而大幅度地提高了产量,干物质的积累量与夏玉米产量变化规律也同步。从干物质的转运效率以及对籽粒贡献率来看,高产高效模式下花前干物质向籽粒的转移率和贡献率与农户栽培模式差异不显著,这表明,高产高效模式虽然实现了产量的提高,但是其还有进一步的增产潜力,通过管理调控、群体优化方式,进一步提高光合同化物向籽粒的运输。2019 年花后干物质积累量占全生育期的 43.0%~46.0% (44.5%),低于 50%,这可能是由于 2019 年 8、9 月份台风灾害频繁,正值玉米生长开花期,导致玉米大面积倒伏,影响了花后干物质的积累与同化物的转移,对玉米生长造成极大不利影响。

氮肥是夏玉米生产的主要养分限制因子,并且具有很强的流动性^[28-29]。肥料的管理不当不但无法满足农作物的生长和发育过程中的养分需求,还会直接导致土地中的养分消耗量减少或者是冗余,限制了其生产的潜力^[12]。本研究发现,与农户栽培模式相比,高产高效和超高产栽培模式籽粒氮素积

累量分别增加 6.5%~21.2% (13.9%) 和 17.6%~46.1% (31.9%),高产高效模式降低了施氮量,显著提高了氮素偏生产力。张福锁等^[6]的研究结果表明,当施氮量从 60 kg/hm²增加到 240 kg/hm²,玉米的氮肥利用率从 40.2% 跌至 14.4%。刘梦等^[30]的研究结果表明,增加氮肥的施用量会导致氮肥偏生产力降低 32.1%~72.3%,氮肥农学效率提高 12.5%~52.6%,增加密度显著提高了氮肥的部分生产率和氮肥的农业效率。与传统农户栽培模式相比,高产高效和超高产栽培模式明显地提高了氮素的偏生产能力、氮素农学效率及氮素综合利用率,其中高产高效的栽培模式则表现得更佳。

本试验结果表明,在适宜的群体条件下,与农户栽培模式相比,高产高效栽培模式干物质积累,特别是花后干物质积累明显增加,花后同化物向籽粒转运显著提高,实现了产量的提升。且缓释肥一次性施用,种肥同播,较常规复合肥基施+拔节期撒施,更好地满足了玉米各生育阶段养分需求,提高了氮肥偏生产力,进一步增加了玉米生育期干物质和氮素积累量,实现了玉米产量与肥料效率的协同提高。而与高产高效栽培模式相比,超高产模式在不计成本的前提下,增加密度,增加肥料投入,更大程度上提高了产量,然而,氮肥偏生产力、肥料利用率降低,造成肥料冗余,不符合轻简高效绿色栽培理念,只代表江苏省玉米生产潜力。因此,在江苏省实际玉米生产中,适当增加密度,改常规氮肥基施+拔节期撒施为缓控释肥一次性基施,简化施肥,种肥同播,可以显著提高玉米产量及氮肥利用率,实现产量与效率双增长。

参考文献:

- [1] 徐杰. 基于“系统流”理论的中国玉米产业系统协调性研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2012.
- [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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 裴建峰, 张海红, 李鸿萍, 等. 不同行距配置方式对夏玉米冠层结构和群体抗性的影响[J]. 作物学报, 2016, 42(1): 104-112.
- [6] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924.
- [7] 文章荣, 李广浩, 王珏, 等. 江苏省鲜食玉米化肥农药使用及

- 生产现状调研与分析[J].江苏农业科学,2020,48(7):91-96.
- [8] 张世博,施龙建,俞春涛,等.江苏省玉米生产情况调研与分析[J].江苏农业学报,2018,34(6):1410-1418.
- [9] 刘宗华,张战辉.玉米籽粒灌浆速率研究进展[J].东北农业大学学报,2010,41(11):148-153.
- [10] SADRAS V O, EGLI D B. Seed size variation in grain crops: allometric relationships between rate and duration of seed growth[J]. Crop Science, 2008, 48(2): 408-416.
- [11] CHEN X P, CUI Z L, FAN M S, et al. Producing more grain with lower environmental costs[J]. Nature, 2014, 514: 486-489.
- [12] LIU Z, ZHU K L, DONG S T, et al. Effects of integrated agronomic practices management on root growth and development of summer maize[J]. European Journal of Agronomy, 2017, 84: 140-151.
- [13] LIU Z, GAO J, GAO F, et al. Late harvest improves yield and nitrogen utilization efficiency of summer maize[J]. Field Crops Research, 2019, 232: 88-94.
- [14] LIU Z, GAO J, GAO F, et al. Integrated agronomic practices management improve yield and nitrogen balance in double cropping of winter wheat-summer maize[J]. Field Crops Research, 2018, 221: 196-206.
- [15] LIU Z, GAO J, GAO F, et al. Photosynthetic characteristics and chloroplast ultrastructure of summer maize response to different nitrogen supplies[J]. Frontiers in Plant Science, 2018, 9: 576.
- [16] 朱昆仑,靳立斌,董树亭,等.综合农艺管理对夏玉米叶片衰老特性的影响[J].中国农业科学,2014,47(15):2949-2959.
- [17] 靳立斌,崔海岩,李波,等.综合农艺管理对夏玉米氮效率和土壤硝态氮的影响[J].作物学报,2013,39(11):2009-2015.
- [18] 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.
- [19] 李广浩,刘娟,董树亭,等.密植与氮肥用量对不同耐密型夏玉米品种产量及氮素利用效率的影响[J].中国农业科学,2017,50(12):2247-2258.
- [20] 李二珍,靳存旺,闫洪,等.氮肥分次施用比例对春玉米光合速率及产量的影响[J].中国土壤与肥料,2017(5):12-16.
- [21] 张绪成,张福锁,于显枫,等.氮素对高大气CO₂浓度下小麦叶片光合功能的影响[J].作物学报,2010,36(8):1362-1370.
- [22] 常晓,王小博,代华龙,等.不同氮肥利用效率类型玉米自交系的源、库特征及其筛选指标[J].江苏农业学报,2020,36(5):1098-1104.
- [23] 徐如玉,左明雪,袁银龙,等.氮肥用量优化对甜玉米氮肥吸收利用率及氮循环微生物功能基因的影响[J].南方农业学报,2020,51(12):2919-2926.
- [24] 孙彦铭,黄少辉,杨云马,等.河北省夏玉米施肥效果与肥料利用率现状[J].江苏农业科学,2019,47(15):301-306.
- [25] VEGA C R C, ANDRADE F H, SADRAS V O, et al. Seed number as a function of growth. A comparative study in soybean, sunflower and maize[J]. Crop Science, 2001, 41(3):748-754.
- [26] QI W Z, CHEN X L, LIU P, et al. Characteristics of dry matter, accumulation and distribution of N, P and K of super-high-yield summer maize[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2013, 19(1):26-36.
- [27] 杨今胜,王永军,张吉旺,等.三个超高产夏玉米品种的干物质生产及光合特性[J].作物学报,2011,37(2):355-361.
- [28] ROGER P A, LADHA J K. Biological N₂ fixation in wetland rice fields: estimation and contribution to nitrogen balance[J]. Plant and Soil, 1992, 141: 41-55.
- [29] SAINJU U M, LENSSEN A W, ALLEN B L, et al. Soil residual nitrogen under various crop rotations and cultural practices[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2017, 180: 187-198.
- [30] 刘梦,梁茜,葛均筑,等.不同密度下施氮量对夏玉米产量和氮肥利用效率的影响[J].华北农学报,2019,34(6):153-159.

(责任编辑:张震林)