

供氮水平对不同氮效率玉米品种氮素吸收、干物质形成及产量的影响

王帅丽^{1,2}, 穆心愿², 杨豫龙², 徐佳敏^{1,2}, 刘天学¹, 温涛^{1,2}, 付景²,
郑玉珍², 赵亚丽¹, 李鸿萍¹, 张改平³, 赵霞²

(1. 河南农业大学农学院, 郑州 450002; 2. 河南省农业科学院粮食作物研究所/河南省玉米绿色精准生产国际联合实验室, 郑州 450002;
3. 禹州市农业农村局, 河南 禹州 461670)

摘要: 以低氮高效型玉米品种郑单958、高氮高效型玉米品种先玉335、双低效型玉米品种豫单606、双高效型玉米品种秋乐368为材料, 研究不同氮效率玉米品种在不施氮肥和纯氮90、180、270、360 kg/hm²处理下产量、干物质积累与转运及氮素吸收利用的差异。结果表明, 与双低效型品种相比, 低氮高效型品种在低氮条件下可以正常维持物质合成, 具有较高的氮素积累量和干物质积累量, 粒重增加, 进而具有较高产量优势; 高氮高效型品种在高氮条件下具有较高的花后干物质积累量、氮素积累量, 能维持较长时间的光合作用, 子粒库容量较高, 库调节能力较强, 子粒产量存在优势; 双高效型品种同时具有以上特性。

关键词: 玉米; 品种; 供氮水平; 干物质积累; 氮素吸收

中国分类号: S513.062

文献标识码: A

Effects of Nitrogen Supply Levels on Nitrogen Uptake, Dry Matter Production and Yield of Maize Varieties with Different Nitrogen Efficiency

WANG Shuai-li^{1,2}, MU Xin-yuan², YANG Yu-long^{1,2}, XU Jia-min^{1,2}, LIU Tian-xue¹, WEN Tao^{1,2}, FU Jing²,
ZHENG Yu-zhen², ZHAO Ya-li¹, LI Hong-ping¹, ZHANG Gai-ping³, ZHAO Xia²

(1. College of Agronomy, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002; 2. Cereal Institute, Henan Academy of Agricultural Sciences/Henan International Joint Laboratory on Maize Precision Production, Zhengzhou 450002;
3. Yuzhou Agricultural and Rural Bureau, Yuzhou 461670, China)

Abstract: This study investigated the differences of yield, dry matter accumulation and transport, and nitrogen uptake and utilization of maize varieties with different nitrogen efficiency under the treatment of no nitrogen and the N amount of 90, 180, 270, 360 kg/ha with Zhengdan958, Xianyu335, Yudan606 and Qiule368 as materials. The results showed that, compared with the low-nitrogen inefficient cultivars, the low-nitrogen efficient cultivars could maintain the normal substance synthesis under low nitrogen stress, which had higher nitrogen accumulation, higher dry matter accumulation and heavier grain weight, thus had higher yield advantages. The high-nitrogen efficient cultivars had higher dry matter accumulation and nitrogen accumulation after anthesis, and could maintain photosynthesis for a longer time, and possessing higher sink capacity and stronger sink regulation ability under high nitrogen conditions, thus achieving a yield advantage. The efficient-efficient cultivars had the above characteristics of the low-nitrogen efficient cultivars and the high-nitrogen efficient cultivars.

Key words: Maize; Variety; Nitrogen supply level; Dry matter accumulation; Nitrogen absorption

录用日期: 2022-05-23

基金项目: 河南省农业科学院基础性科研项目(JC009)、河南省农业科学院农业生产发展资金示范推广项目(2021)、国家重点研发计划项目(2017YFD0301103)、耐低氮绿色玉米品种筛选及关键评价指标研究(2021ZC10)

作者简介: 王帅丽(1993-), 河南商丘人, 从事玉米栽培生理研究。E-mail: 18438616519@163.com

赵霞为本文通信作者。E-mail: zhaoxia1007@126.com

玉米是关系中国粮食安全的第一大粮食作物^[1]。玉米作为氮敏感作物,整个生长季对氮肥需求较高。近年来,我国玉米连年增产,玉米产量增加的幅度远远低于施氮水平上升的幅度^[2],导致氮肥利用率明显下降。同时氮肥过量及不合理施用造成水体富营养化和空气污染等一系列环境问题^[3]。因此,深入了解玉米氮肥需求和氮肥供应之间的关系对优化施肥技术有重要意义。

氮在植物生长发育、提高光合作用效率和作物生产力等方面起着至关重要的作用^[4]。选育氮高效品种已成为提高作物产量的有力工具^[5],可达到高效、节氮的效果。Chen等^[6,7]通过对40个玉米品种的研究发现,所有玉米品种存在基因型差异,并将其划分为在高、低氮条件下均高产的双高效型品种、在高氮条件下高产的高氮高效型品种、在低氮下高产的低氮高效型品种及在高、低氮条件下均低产的双低效型品种。在夏玉米品种更替过程中,新老品种植株器官氮素积累存在差异^[8,9],其干物质积累、分配已发生变化。前人研究表明,施氮水平影响植株体内氮营养再利用、吐丝期及吐丝后氮素吸收、延缓叶片衰老^[10,11]。崔超等^[12]研究表明,在相同施氮水平下,氮高效品种比氮低效品种有更高的生物量,形成产量的差异主要是来源于花后干物质积累和氮素吸收不同。谢孟林等^[13]研究表明,氮高效品种较氮低效品种对低氮环境具有更强的适应性。目前关于该

方面的研究主要集中在不同基因型玉米氮效率筛选,缺乏对不同氮效率玉米品种产量差异与物质生产关系的深入研究,且在多个氮肥梯度下比较不同品种资源对氮素反应差异的研究鲜见报道。本研究以本课题组的前期研究为基础^[14,15],以筛选出低氮高效型、高氮高效型、双低效型、双高效型的不同氮效率玉米品种为材料,设5个氮肥梯度,对不同氮效率玉米品种的干物质形成和氮素吸收进行研究,明确不同氮效率玉米品种干物质形成差异,为玉米氮效率遗传改良和生产实践提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2019–2020年在河南省许昌市禹州市古城镇小集村(东经113°56′,北纬34°09′)进行。试验地地势平坦,排灌方便,地力均匀一致,种植制度为1年2熟小麦–玉米轮作制。该地区属于温带季风性气候,夏季雨量集中,2019–2020年玉米全生育期气象数据见图1。土壤pH值为7.5,有机质24.8 g/kg、速效钾152.22 mg/kg、速效磷30.76 mg/kg、碱解氮98.34 mg/kg。试验材料为本课题组前期试验筛选出的低氮高效型品种(郑单958,ZD958)、高氮高效型(先玉335,XY335)、双低效型(豫单606,YD606)、双高效型(秋乐368,QL368)。

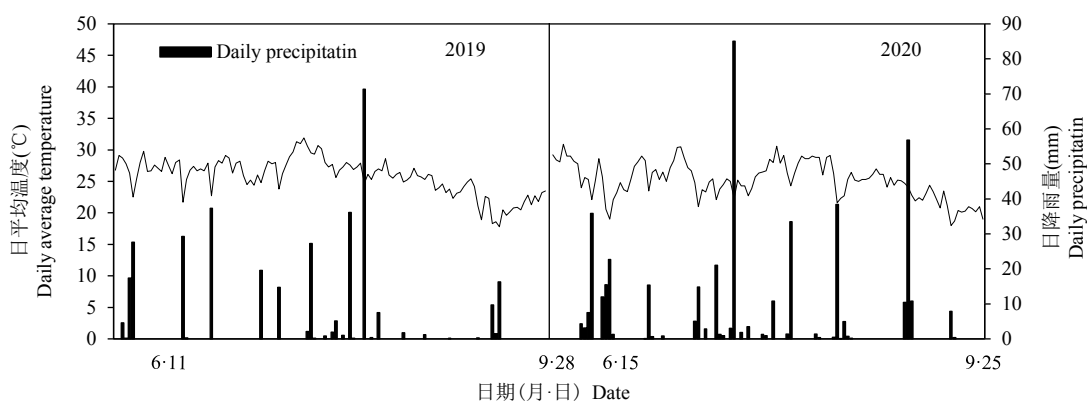


图1 2019–2020年玉米全生育期气象数据

Fig.1 Meteorological data of maize growth period in 2019–2020

1.2 试验设计

试验分别于2019年6月11日和2020年6月15日播种。试验采用裂区设计,施氮量为主区,品种为副区。试验设置4个品种,每个品种设5个氮肥梯度,即不施氮(N0)、施氮90 kg/hm²(N90)、施氮180 kg/hm²(N180)、施氮270 kg/hm²(N270)、施氮360 kg/hm²(N360)。种植密度为67 500株/hm²,行距60 cm,每

个小区6行,行长6 m,每个处理3次重复,共60个小区。试验使用肥料为硫酸钾(K₂O 54%)、过磷酸钙(P₂O₅ 12%)、尿素(N 46%)。各处理磷、钾肥施用量相同,即150 kg/hm² P₂O₅、150 kg/hm² K₂O。所有肥料均于拔节期由人工行间开沟,一次性施入,其他管理同当地大田。收获期分别为2019年9月28日和2020年9月25日。

1.3 测定项目与方法

于拔节期每个小区选取12株长势均匀一致、有代表性的植株进行挂牌,随后在玉米吐丝期、成熟期在各小区中选取3株,并将地上部植株进行分类。在吐丝期分为茎鞘(茎秆+叶鞘)、叶片和穗3个部分,成熟期分为茎鞘(茎秆+叶鞘)、叶片、苞轴(苞叶+穗轴)和子粒4个部分,然后把样品放入烘箱中105℃杀青30 min,80℃烘干至恒重,冷却至室温后用千分之一天平称重。称取0.1 g已粉碎过筛的样品于消煮管中,加入5 mL浓硫酸消煮,H₂O₂作催化剂,采用连续流动分析仪(AA3,SEAL-Analytical,Germany)测定植株和子粒氮素含量^[16],利用测定结果计算干物质、氮素积累相关指标。

于玉米成熟期调查每个小区有效穗数,每个小区选取中间两行收获全部果穗,自然风干后从中选取具有代表性的10穗考种得出穗粒数和百粒重。根据实收两行进行实际产量测定,最终按14%含水量折算子粒产量^[17]。

1.3.1 相关计算公式

氮素积累量=成熟期植株干物质质量×氮素含量;
吐丝期干物质转运量=吐丝期营养器官干物质积累量-成熟期营养器官干物质积累量;
吐丝期干物质转运对子粒贡献率=吐丝期干物质转运量/成熟期子粒干物质积累量×100%;
花后干物质积累量=成熟期干物质积累量-吐

丝期干物质积累量;
花后干物质积累量对子粒贡献率=100%-吐丝期干物质转运对子粒贡献率^[18];
吐丝期氮素转运量=吐丝期营养器官氮素积累量-成熟期营养器官氮素积累量;
花后氮素积累量=成熟期氮素积累量-吐丝期氮素积累量;
吐丝期氮素转运对子粒贡献率=吐丝期氮素转运量/成熟期子粒氮素积累量×100%;
花后氮素积累量对子粒贡献率=100%-吐丝期氮素转运对子粒贡献率;
氮收获指数=成熟期子粒氮素积累量/成熟期植株氮素积累量×100%;
收获指数=成熟期子粒干重/成熟期植株总干重×100%^[19]。

1.4 数据处理与分析

采用Microsoft Excel 2019进行数据整理并做图表,采用SPSS 23进行统计分析,采用Duncan's进行处理间差异性检验($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 产量相关性状、干物质和氮素积累转运的方差分析

由两年试验结果分析可知(表1),除穗粒数和叶片干物质转运量外,氮肥处理和品种对产量、产量构

表1 产量相关性状、干物质和氮素积累转运的方差分析(F 值)
Table 1 Variance analysis of yield-related traits, dry matter and nitrogen accumulation and transport(F -value)

变异来源 Source of variation	年份 Year(Y)	品种 Cultivar(C)	氮肥 Nitrogen(N)	Y×C	Y×N	C×N	Y×C×N
产 量	3.18	90.10**	121.88**	0.60	1.29	2.50*	1.20
穗粒数	24.59*	2.52	129.55**	1.87	4.93*	2.50*	1.61
百粒重	0.01	39.48**	63.21**	8.20**	3.59	2.50*	1.93
有效穗数	20.34*	3.42*	4.21*	1.97	4.71*	2.50*	1.59
吐丝期干物质积累量	2.24	34.50**	211.77**	7.67**	10.77**	2.50*	3.20**
成熟期干物质积累量	4.70	38.05**	237.19**	4.14*	10.65**	2.50*	3.05**
叶片干物质转运量	0.14	3.70*	0.96	2.70	0.21	2.50*	0.17
花后干物质积累量	3.48	31.65**	155.43**	5.73**	4.12*	2.50*	1.78
收获指数	0.77	38.56**	10.22**	6.99**	6.53*	2.50*	1.21
吐丝期氮素积累量	—	7.18**	248.47**	—	—	4.04**	—
成熟期氮素积累量	—	27.70**	721.52**	—	—	3.18**	—
氮素转运量	—	10.21**	103.73**	—	—	7.16**	—
氮素转运对子粒氮素积累贡献率	—	3.07*	6.75*	—	—	15.48**	—
花后氮素积累量	—	21.22**	45.09**	—	—	13.56**	—
氮收获指数	—	11.60**	4.47*	—	—	1.91	—

注:产量及产量构成因素、干物质转运量和积累量为2019–2020年数据,其余指标为2020年数据。“*、**”分别表示在0.05、0.01水平差异显著。下表、下图同。

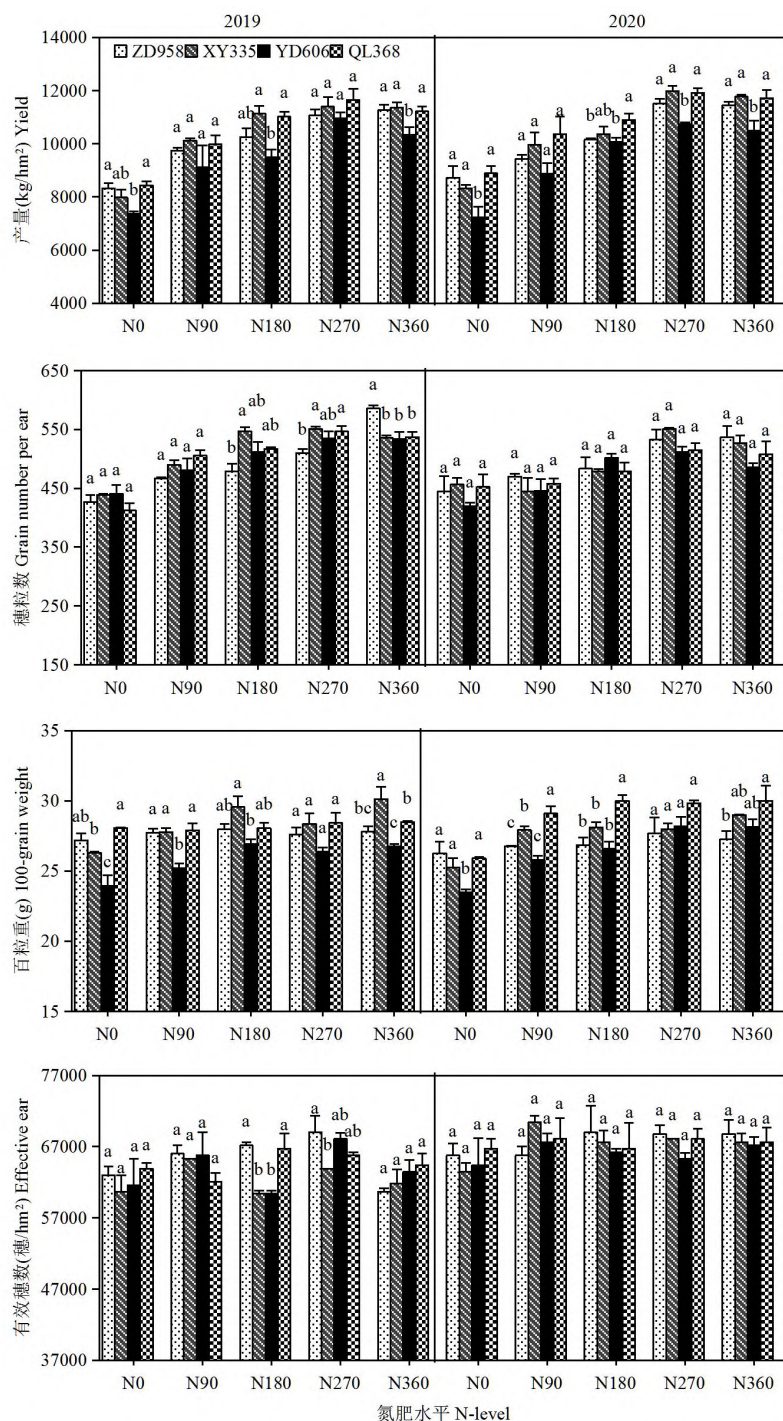
Note: Yield and yield components, dry matter transshipment volume and accumulation volume are data from 2019 to 2020, while other indicators are data from 2020. * and ** indicate the significance at 0.05 and 0.01 level, respectively. The same below.

成因素及干物质、氮素积累量均具有显著或极显著影响,且二者交互作用对产量、产量构成因素及干物质、氮素各营养指标均具有显著影响;穗粒数受氮肥处理有极显著影响,叶片干物质转运量受品种影响显著。不同年份间的穗粒数和有效穗数存在显著差异,吐丝期干物质积累量、成熟期干物质积累量受年

份×品种、年份×氮肥、年份×品种×氮肥显著或极显著影响;叶片干物质积累量、收获指数受年份×品种、年份×氮肥显著或极显著影响。

2.2 不同氮效率玉米品种产量及产量构成因素在不同供氮水平下的差异性分析

由图2可知,两年数据表明,随施氮量增加,4个



注:不同小写字母表示同一氮素水平下品种间显著差异($P < 0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters of different varieties indicate significant differences among varieties ($P < 0.05$). The same below.

图2 氮肥对不同氮效率玉米品种产量及构成因素的影响

Fig.2 Effects of nitrogen fertilizer on yield and its components of maize varieties with different nitrogen efficiency

玉米品种的子粒产量均先升高后趋于平稳,且4个玉米品种均在N270处理时达到最高值。同一氮肥处理下,均以双低效型品种豫单606的子粒产量最低。综合两年数据,ZD958在N0、N90、N180、N270、N360处理下的子粒产量分别比YD606高16.75%、6.58%、4.29%、4.16%、9.14%,XY335的子粒产量分别比YD606高11.70%、11.66%、9.91%、7.79%、11.13%,QL368的子粒产量分别比YD606高18.67%、13.10%、11.98%、8.72%、10.22%。低氮条件(N0和N90处理,下同)下,低氮高效型(ZD958)和双高效型(QL368)品种的子粒产量高于双低效型(YD606)品种;高氮条件(N270和N360处理,下同)下,双高效型(QL368)和高氮高效型(XY335)的子粒产量及产量构成因素均高于双低效型品种。

玉米品种的穗粒数、百粒重受氮肥处理显著或极显著影响,随施氮水平的增加而上升。低氮条件下,4个不同氮效率玉米品种间有效穗数、穗粒数差异均不显著,百粒重的差异达显著水平。综合两年数据,在N0、N90处理下,ZD958的百粒重分别比YD606高12.70%、6.85%,XY335的百粒重分别比YD606高8.73%、9.16%,QL368的百粒重分别比

YD606高13.81%、11.76%。高氮条件下,均以YD606的穗粒数、百粒重、有效穗数最低。

2.3 不同氮效率玉米品种干物质积累与转运的差异性分析

2.3.1 不同施氮水平对不同氮效率玉米品种干物质积累的影响

由图3可见,氮肥用量对4个玉米品种干物质积累量的影响明显。随施氮量的增加,不同氮效率玉米品种植株干物质积累量不断增加。各施氮处理下,4个品种植株干物质积累量均存在显著差异,且以YD606的干物质积累量最低,其收获指数显著高于XY335、QL368。吐丝期,ZD958干物质积累量在N0、N90处理下比YD606分别高22.61%、14.36%,XY335干物质积累量在N0、N90处理下比YD606高16.17%、6.90%,QL368干物质积累量在N0、N90处理下比YD606高31.68%、20.50%;在N180处理下,ZD958、XY335、QL368这3个品种的干物质积累量分别比YD606高6.24%、6.45%、16.95%;在N270、N360处理下,XY335和QL368干物质积累量与YD606相比高7.08%、13.18%和13.00%、22.00%。在成熟期,在N0、N90处理下,ZD958干物质积累量

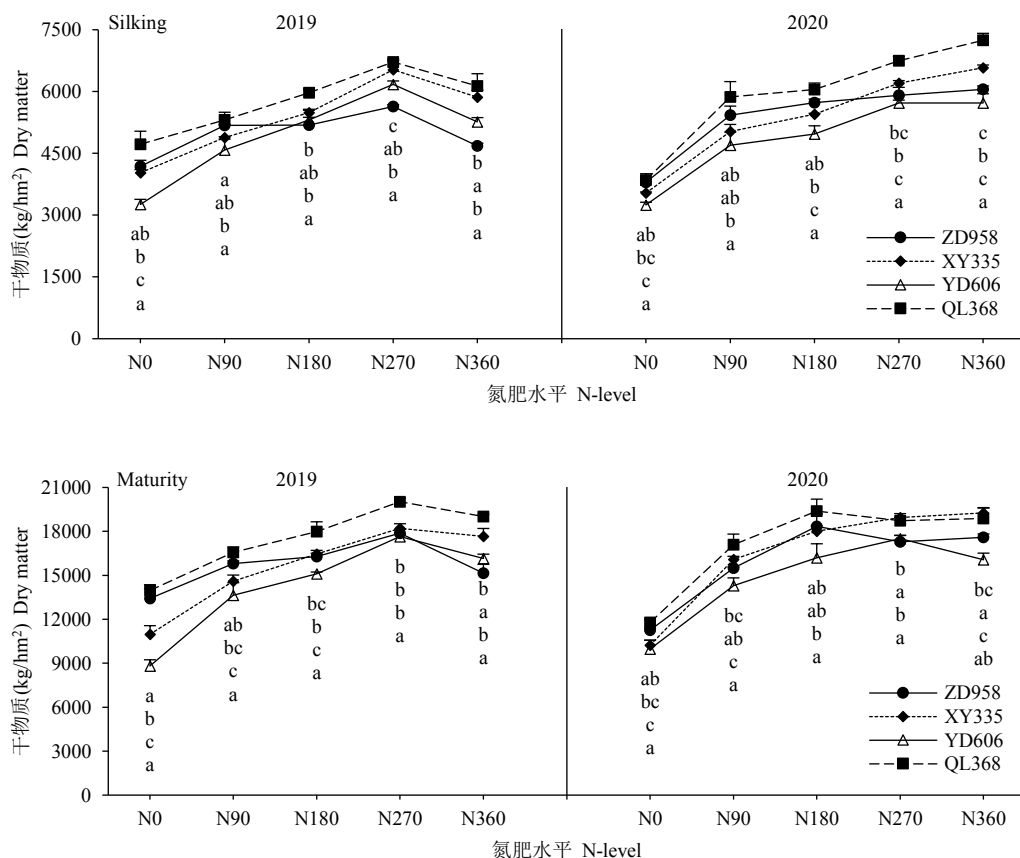


图3 施氮水平对不同氮效率玉米品种干物质积累量的影响

Fig.3 Effects of nitrogen application levels on dry matter accumulation of maize varieties with different nitrogen efficiency

与YD606相比高31.37%、12.11%,XY335干物质积累量与YD606相比高12.90%、9.96%,QL368干物质积累量与YD606相比高37.08%、2.53%;在N270、N360处理下,XY335干物质积累量与YD606相比高13.20%、20.73%,QL368干物质积累量与YD606相比高17.97%、26.55%。在低氮条件(N0和N90处理)下,低氮高效型和双高型品种具有较大的干物质生产潜力;在高氮条件(N270和N360处理)下高氮高效型和双高型品种干物质积累量显著高于双低效型玉米品种。

2.3.2 施氮水平对不同氮效率玉米品种干物质转运的影响

由表2可知,不同氮效率玉米品种的干物质转运器官存在差异,茎鞘没有输出,只有叶片进行物质转运。氮肥处理和品种对不同氮效率玉米品种的

茎鞘、叶片转运量及花后干物质积累量对子粒贡献率均无显著影响,对花后干物质积累量的影响达显著水平。与N0处理相比,施氮处理可提高4个玉米品种的花后干物质积累量。综合两年数据来看,ZD958在N0、N90、N180、N270、N360条件下花后干物质积累量比YD606高6.01%、11.00%、12.84%、1.51%、3.76%;XY335在N0、N90、N180、N270、N360条件比YD606高11.17%、11.48%、11.95%、4.92%、15.42%;QL368在N0、N90、N180、N270、N360条件比YD606高39.94%、20.54%、20.74%、8.71%、15.60%。在低氮条件(N0和N90处理)下,低氮高效型和双高型品种具有较大的花后干物质积累潜力;在高氮条件(N270和N360处理)下高氮高效型和双高型品种花后干物质积累量显著高于双低效型玉米品种。

表2 施氮水平对不同氮效率玉米品种干物质转运的影响

Table 2 Effects of dry matter transport on dry matter accumulation in maize grains under different nitrogen application rates

氮素 水平 N-level	品 种 Variety	2019年					2020年				
		茎鞘转运量	叶片转运量	花后积累量	叶片对子粒	收获指	茎鞘转运量	叶片转运量	花后积累量	叶片对子粒	收获指
		(kg/hm ²) SDMR	(kg/hm ²) LDMR	(kg/hm ²) DMAA	贡献率(%) LDMCG	数(%) HI	(kg/hm ²) SDMR	(kg/hm ²) LDMR	(kg/hm ²) DMAA	贡献率(%) LDMCG	数(%) HI
N0	ZD958	-740.51 a	270.34 a	9 229.64 a	3.75 a	53 a	-260.01 a	75.52 a	7 459.49 a	1.22 a	55 a
	XY335	-462.97 a	68.92 a	6 946.06 b	1.37 a	51 ab	-408.84 a	170.27 a	6 694.47 a	3.37 a	50 b
	YD606	-522.65 a	147.42 a	5 553.73 b	3.53 a	51 ab	-396.28 a	146.00 a	6 716.34 a	3.07 a	54 a
	QL368	-683.57 a	39.15 a	9 242.86 a	0.59 a	50 b	-697.43 b	128.26 a	7 928.46 a	2.12 a	50 b
N90	ZD958	-510.48 a	224.77 a	10 631.51 ab	2.41 a	57 a	-34.89 a	118.97 a	10 064.95 b	1.30 a	56 a
	XY335	-684.23 a	7.85 a	9 725.16 bc	0.11 a	51 b	-696.65 b	108.08 a	11 062.52 a	1.27 a	53 a
	YD606	-699.15 a	164.68 a	9 054.39 c	2.38 a	54 ab	-533.95 ab	152.29 a	9 591.99 b	1.91 a	55 a
	QL368	-512.59 a	39.72 a	11 250.64 a	0.37 a	53 ab	-480.39 ab	201.95 a	11 225.81 a	2.28 a	53 a
N180	ZD958	-375.12 a	192.30 a	11 093.47 a	2.10 a	57 a	-570.93 a	50.41 a	12 613.06 a	0.53 a	58 a
	XY335	-520.39 a	112.65 a	10 960.26 ab	1.29 a	54 ab	-443.85 a	56.87 a	12 559.40 a	0.55 a	56 ab
	YD606	-947.39 a	69.07 a	9 788.61 b	0.89 a	50 b	-270.64 a	83.19 a	11 220.20 a	0.83 a	58 a
	QL368	-446.76 a	84.28 a	12 018.74 a	0.85 a	55 a	-1196.43 a	235.31 a	13 347.04 a	2.48 a	53 b
N270	ZD958	-646.96 a	325.55 a	12 242.40 ab	3.19 a	56 a	-615.74 a	142.59 a	11 376.19 b	1.52 a	56 a
	XY335	-40.09 a	271.06 a	11 669.35 b	2.52 a	56 a	-335.04 a	219.90 a	12 740.47 a	2.10 a	56 a
	YD606	-495.34 a	255.22 a	11 475.42 b	2.63 a	56 a	-364.19 a	96.88 a	11 790.70 ab	0.97 a	57 a
	QL368	-260.02 a	178.33 a	13 310.53 a	1.56 a	57 a	-1020.50 a	473.46 a	11 983.08 ab	5.18 a	52 b
N360	ZD958	-505.00 ab	142.79 a	10 472.12 b	1.55 a	57 a	-87.15 a	57.80 b	11 543.34 ab	0.58 b	57 a
	XY335	-587.64 b	16.58 a	11 803.30 ab	0.22 a	53 a	-870.00 a	208.88 ab	12 685.72 a	2.03 ab	52 bc
	YD606	-787.41 b	163.01 a	10 876.84 b	1.67 a	55 a	-382.48 a	103.86 ab	10 340.03 b	1.27 ab	54 ab
	QL368	-195.03 a	93.72 a	12 880.98 a	0.88 a	57 a	-972.06 a	372.34 a	11 645.95 ab	3.97 a	50 c

2.4 不同氮效率玉米品种氮素积累、转运的差异性分析

2.4.1 施氮水平对不同氮效率玉米品种氮素积累的影响

由图4可知,与N0处理相比,增施氮肥可提高

玉米植株氮素积累量。随施氮量的增加,4个玉米品种的氮素积累量整体表现为N270>N360>N180>N90>N0,同一施氮量下以YD606的氮素积累量最低。从2个生育时期平均结果来看,ZD958在N0、N90、N360处理下的氮素积累总量比YD606高

40.00%、10.33%、3.86%；XY335 在 N0、N90、N180、N270、N360 条件下比 YD606 高 17.91%、19.44%、6.41%、11.12%、14.48%；QL368 在 N0、N90、N270、N360 条件下比 YD606 高 48.93%、13.25%、8.55%、12.05%。说明在低氮条件(N0 和 N90 处理)下,双高

效型品种(QL368)和低氮高效型(ZD958)氮素吸收能力比双低效型(YD606)强;在高氮条件(N270 和 N360 处理)下,双高效型(QL368)和高氮高效型(XY335)的各生育时期的氮素积累量显著高于 YD606。

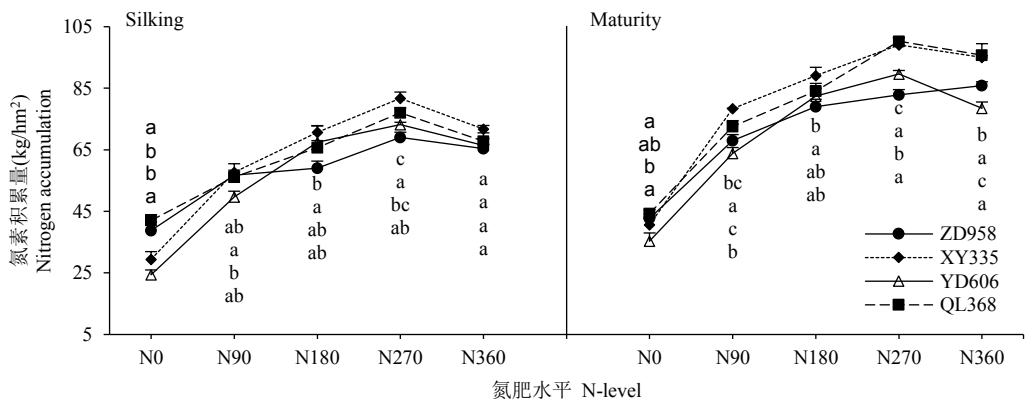


图4 氮肥用量对不同氮效率玉米品种氮素积累的影响

Fig.4 Effects of nitrogen application rate on nitrogen accumulation of maize varieties with different nitrogen efficiency

2.4.2 施氮水平对不同氮效率玉米品种氮素转运的影响

由表 3 可以看出,不同氮效率玉米品种的花前

氮素转运量和花后氮素积累量存在显著差异,高氮会降低氮收获指数。随施氮量增加,不同氮效率玉米品种的花前氮素转运量和花后氮素积累量不断增

表 3 施氮水平对不同氮效率玉米品种氮素转运的影响

Table 3 Effects of nitrogen application rate on nitrogen translocation in maize varieties with different nitrogen efficiency

氮素水平 N-level	品 种 Variety	氮素转运量 (kg/hm ²) NR	氮素转运对子粒氮素 积累贡献率(%) NRCG	花后氮素积累量 (kg/hm ²) NAA	氮收获指数 (%) NHI
N0	ZD958	22.73 b	78.07 b	3.96 b	68 b
	XY335	16.57 c	56.93 c	11.24 a	72 ab
	YD606	14.32 c	54.79 c	10.88 a	74 a
	QL368	28.06 a	88.79 a	2.23 b	71 ab
N90	ZD958	30.34 a	66.20 a	11.14 c	67 c
	XY335	34.58 a	59.39 a	20.65 a	74 ab
	YD606	32.49 a	66.21 a	14.12 bc	77 a
	QL368	33.18 a	64.63 a	16.40 ab	71 bc
N180	ZD958	31.79 b	59.00 b	20.03 a	68 a
	XY335	40.40 a	63.24 ab	18.47 ab	72 a
	YD606	40.63 a	68.61 a	14.89 b	72 a
	QL368	35.30 ab	59.85 b	18.41 ab	70 a
N270	ZD958	37.34 b	66.73 a	13.89 c	68 b
	XY335	49.93 a	68.85 a	17.36 b	73 a
	YD606	39.78 b	66.99 a	16.45 bc	66 b
	QL368	41.15 b	58.73 b	23.27 a	70 ab
N360	ZD958	33.74 c	60.16 bc	20.49 b	65 b
	XY335	42.39 a	61.61 b	23.37 b	72 a
	YD606	39.92 ab	73.61 a	12.07 c	69 ab
	QL368	36.21 bc	54.11 c	27.95 a	70 a

加。在高氮条件(N270 和 N360 处理)下,QL368 和 XY335 的花后氮素积累量分别比 YD606 高 41.46%、131.61% 和 5.54%、93.65%。说明在高氮条件下,双 高效型(QL368)和高氮高效型(XY335)品种具有较大 花后氮素积累潜力。

2.5 产量与干物质、氮营养性状的相关性分析

表 4 产量与干物质、氮营养性状相关性分析

Table 4 Correlation analysis of yield with dry matter and nitrogen nutritional characters

氮处理 N treat- ment	指 标 Index	产 量 Yield	穗粒数 Grains per ear	百粒重 100- krenel weight	有效 穗数 Effective ear	吐丝期 干物质 积累量 DMAS	成熟期 干物质 积累量 DMAM	花后 干物质 积累量 DMAA	吐丝期 氮素 积累量 NAS	成熟期 氮素 积累量 NAM	氮素 转运量 NR	花前氮素 转运对子 粒氮素贡 献率 NRCC
低氮	Grains per ear	0.80**										
	100-krenel weight	0.81**	0.56**									
	Effective ear	0.53**	0.10	0.14								
	DMAS	0.90**	0.70**	0.78**	0.45*							
	DMAM	0.91**	0.63**	0.79**	0.54**	0.97**						
	DMAA	0.89**	0.58**	0.77**	0.57**	0.94**	0.99**					
	NAS	0.86**	0.61**	0.73**	0.52**	0.87**	0.93**	0.94**				
	NAM	0.84**	0.66**	0.64**	0.51*	0.86**	0.90**	0.90**	0.94**			
	NR	0.82**	0.55**	0.68**	0.57**	0.80**	0.88**	0.90**	0.95**	0.87**		
	NRCC	0.12	-0.14	0.31	0.12	0.08	0.13	0.16	0.16	-0.16	0.31	
中氮	Grains per ear	0.45*	0.48*	0.19	0.27	0.45*	0.45*	0.43*	0.41*	0.70**	0.33	-0.74**
	100-krenel weight	0.77**	0.18									
	Effective ear	0.45	-0.65*	-0.05								
	DMAS	0.66*	-0.27	0.57	0.47							
	DMAM	0.77**	-0.35	0.54	0.68*	0.92**						
	DMAM	0.78**	-0.37	0.51	0.72**	0.86**	0.99**					
	DMAA	0.10	0.20	0.11	-0.11	0.26	0.18	0.15				
	NAS	0.28	0.16	0.34	-0.07	0.37	0.29	0.24	0.92**			
	NAM	-0.20	0.40	-0.12	-0.40	-0.11	-0.26	-0.30	0.86**	0.74**		
	NR	-0.55	0.24	-0.50	-0.40	-0.41	-0.49	-0.51	0.57	0.30	0.79**	
高氮	Grains per ear	0.34	-0.14	0.46	0.13	0.14	0.15	0.15	-0.55	-0.17	-0.58*	-0.80**
	100-krenel weight	0.77**	0.18									
	Effective ear	0.61**	-0.10									
	DMAS	0.25	-0.25	-0.22								
	DMAS	0.50*	-0.04	0.59**	0.05							
	DMAM	0.57**	-0.02	0.55**	0.20	0.87**						
	DMAA	0.54**	-0.01	0.46*	0.27	0.67**	0.95**					
	NAS	0.47*	0.09	0.29	0.21	0.48*	0.54**	0.51*				
	NAM	0.66**	0.19	0.63**	0.00	0.76**	0.81**	0.73**	0.74**			
	NR	0.20	0.07	0.15	-0.01	0.41*	0.36	0.28	0.79**	0.48*		
	NRCC	-0.49*	-0.21	-0.50*	0.07	-0.42*	-0.51*	-0.49*	0.10	-0.51*	0.45*	
	NAA	0.48*	0.18	0.62**	-0.22	0.61**	0.62**	0.54**	0.01	0.68**	-0.15	-0.87**

注：DMAS 表示吐丝期干物质积累量;DMAM 表示成熟期干物质积累量;DMAA 表示花后干物质积累量;NAS 表示吐丝期氮素积累量; NAM 表示成熟期氮素积累量;NR 表示氮素转运量;NRCC 表示花前氮素转运对子粒氮素贡献率;NAA 表示花后氮素积累量。

Note: DMAS, Dry matter accumulation during silking; DMAM, Dry matter accumulation at maturity; DMAA, Dry matter accumulation after anthesis; NAS, Nitrogen accumulation at silking stage; NAM, Nitrogen accumulation at maturity; NR, Nitrogen remobilization; NRCC, Contribution of nitrogen remobilization to grain; NAA, Nitrogen accumulation after anthesis.

由表4可以看出。在低氮条件下,除花前氮素转运量对子粒贡献率外,不同品种子粒产量与干物质积累量、花后干物质积累量及不同生育期氮素积累量、花前氮素转运量等各营养性状呈极显著正相关;不同氮效率玉米品种穗粒数、百粒重与干物质积累、氮素积累关系密切。中氮条件下,不同品种子粒产量与穗粒数、有效穗数、不同生育期干物质积累量及花后氮素积累量呈显著或极显著正相关;不同氮效率玉米品种穗粒数与百粒重呈显著正相关。高氮

条件下,不同氮效率玉米品种子粒产量和不同生育期干物质积累量、氮素积累量及花后氮素积累量相关系数较大;百粒重与不同生育期干物质积累量、成熟期氮素积累量及花后氮素积累量呈极显著正相关。

2.6 不同氮效率玉米品种各性状指标的主成分分析

在相关分析的基础上,把产量、产量构成因素及干物质、氮素相关性状进行主成分分析(表5),不同施氮条件下可提取的主成分不同。在低氮条件下可

表5 不同氮效率玉米各性状指标的主成分分析
Table 5 Principal component analysis of maize traits with different nitrogen efficiency

性 状 Trait	低氮 Low-N				中氮 Normal-N				高氮 High-N				
	PCA1	PCA2	PCA3	PCA4	PCA1	PCA2	PCA3	PCA4	PCA1	PCA2	PCA3	PCA4	PCA5
产 量	0.95	0.06	0.01	-0.02	0.92	0.00	0.02	0.17	0.73	0.28	0.35	0.20	-0.07
穗粒数	0.71	0.37	-0.26	0.07	0.09	0.18	-0.89	-0.10	0.18	0.11	0.88	-0.26	-0.07
百粒重	0.85	-0.16	-0.34	-0.09	0.88	-0.03	-0.27	0.12	0.74	0.19	-0.29	-0.23	-0.12
有效穗数	0.49	-0.12	0.73	-0.03	0.28	-0.10	0.84	0.18	0.01	0.02	-0.07	0.93	0.11
吐丝期干物质积累量	0.96	0.07	-0.05	0.07	0.77	0.19	0.41	0.17	0.70	0.40	-0.23	-0.03	0.41
成熟期干物质积累量	0.98	0.01	0.08	0.05	0.82	0.10	0.54	0.02	0.80	0.37	-0.16	0.21	0.29
叶片干物质转运量	-0.14	-0.09	-0.16	0.86	0.26	-0.09	0.15	0.89	0.10	0.09	0.01	0.10	0.92
花后干物质积累量	0.97	-0.02	0.14	0.05	0.81	0.07	0.56	-0.03	0.75	0.30	-0.09	0.34	0.17
收获指数	0.36	0.06	0.15	0.80	-0.19	-0.72	0.10	0.13	-0.36	-0.19	0.71	0.19	0.07
吐丝期氮素积累量	0.95	-0.01	0.17	0.14	0.13	0.97	-0.03	-0.02	0.27	0.85	0.09	0.30	-0.04
成熟期氮素积累量	0.90	0.31	0.21	0.09	0.33	0.82	-0.07	0.19	0.80	0.51	0.04	0.04	0.02
氮素转运量	0.89	-0.12	0.33	0.12	-0.23	0.90	-0.32	0.11	-0.04	0.98	-0.04	-0.04	0.08
氮素转运对子粒氮素积累贡献率	0.17	-0.95	-0.01	0.01	-0.59	0.69	-0.15	-0.25	-0.86	0.42	-0.12	0.08	-0.05
花后氮素积累量	0.42	0.85	0.19	-0.05	0.37	-0.67	-0.08	0.45	0.90	-0.17	-0.03	-0.27	0.08
氮收获指数	-0.21	0.39	0.69	-0.04	-0.17	0.28	-0.64	0.43	0.24	0.68	-0.13	-0.37	0.30
特征值	8.25	2.17	1.38	1.28	5.59	4.02	2.12	1.06	6.26	2.47	1.59	1.54	1.01
贡献率	53.88	13.89	9.81	9.61	29.35	27.01	19.46	9.48	35.09	21.20	10.73	10.22	8.51
累积贡献率	53.88	67.76	77.57	87.18	29.35	56.36	75.82	85.30	35.09	56.29	67.02	77.24	85.75

表6 不同氮效率玉米品种综合得分表
Table 6 Comprehensive score table of maize varieties with different nitrogen efficiency

氮素水平 N-level	品 种 Variety	F1	F2	F3	F4	F5	F	排 名 Rank
低 氮	ZD958	0.23	-0.63	-0.48	0.76	—	0.07	2
	XY335	-0.01	0.76	-0.06	-0.58	—	0.05	3
	YD606	-0.79	0.56	0.75	0.39	—	-0.27	4
	QL368	0.57	-0.68	-0.21	-0.57	—	0.16	1
中 氮	ZD958	-0.41	-1.08	0.94	0.22	—	-0.24	3
	XY335	0.58	0.48	-0.83	-0.12	—	0.15	2
	YD606	-1.27	0.54	-0.32	-0.27	—	-0.37	4
	QL368	1.10	0.06	0.21	0.17	—	0.46	1
高 氮	ZD958	-0.37	-0.86	0.81	0.37	-0.19	-0.24	3
	XY335	0.31	1.22	0.14	-0.48	-0.22	0.37	2
	YD606	-1.15	-0.11	-0.56	0.02	-0.12	-0.58	4
	QL368	1.20	-0.25	-0.39	0.08	0.53	0.44	1

提取4个主成分,第一主成分主要由产量、不同生育期干物质积累量、花后干物质积累量、不同生育期氮素积累量组成,第二主成分主要是花后氮素积累量,第三主成分是有有效穗数,第四主成分是收获指数。从不同氮效率玉米品种得分表可以看出(表6),在低氮条件下,双高效型品种(QL368)得分最高,低氮高效型(ZD958)次之,以双低效型品种(YD606)最低。中氮条件下获得4个主成分,第一主成分主要由产量、百粒重、不同生育期干物质积累量组成,第二主成分主要由不同生育期氮素积累量、氮素转运量组成,第三主成分有效穗数、第四主成分主要是叶片干物质转运量,综合得分以双高效型品种(QL368)最高,高氮高效型(XY335)次之。高氮条件下主要提取5个主成分,第一主成分主要是花后氮素积累量、成熟期氮素及干物质积累量组成,第二主成分主要是氮素转运量、吐丝期氮素积累量组成,第三主成分主要是由穗粒数组成,第四主成分主要是有效穗数组成,第五主成分主要是吐丝期干物质积累量组成,综合得分以双高效型品种(QL368)最高,高氮高效型(XY335)次之,双低效型品种(YD606)最小。

3 结论与讨论

氮作为植物的基本营养元素,对植株物质生产有不可替代的作用^[20],物质生产是作物子粒产量形成的基础。王强等^[21]研究认为,氮素和光照在植物生长中只有维持平衡、协调水平,两者才能发挥对作物生长最佳的互作效应,从而保证作物理想生长,如果氮素供应失调将导致作物氮素吸收下降^[22]。甄新爱^[23]研究显示,氮低效品种出现光氮最佳互作所需要的氮素要高于氮高效品种,即氮高效品种比氮低效品种具有更高的氮素生产潜力。本研究表明,低氮高效型品种和双高效型品种在低氮条件下与双低效品种相比,具有较高的氮素积累量,且产量与氮素积累量表现一致^[24]。分析原因可能是氮素供应不足的情况下,低氮高效型和双高效型品种营养器官较高的氮素吸收能力,为子粒灌浆提供充足的物质基础,能保持较强的物质代谢能力和光合生产能力,最终表现出产量优势^[25]。Mu等^[26]研究表明,在低氮胁迫下,植株氮素优化分配是光合作用和产量最大化的关键适应机制。前人研究表明,低氮胁迫影响作物植株对养分的吸收、转运,进而影响作物物质生产,最终影响作物的产量,不同品种受影响的程度存在显著差异。春亮^[27]研究表明,玉米在低氮胁迫下干物质积累量明显下降,氮低效品种降幅明显高于氮高效品种。李强等^[28]研究显示,低氮条件下氮高

效型品种正红311地上部干物质降幅显著低于氮低效型品种先玉508。源能力和库容量的协同增加是玉米增产的根本原因。吴雅薇等^[29]研究显示,低氮品种正红311的花后干物质积累能够显著促进有效穗数增加,进而提升子粒产量。本研究表明,低氮胁迫条件下,低氮高效型和双高效型品种营养器官具有较高的干物质积累量,且低氮高效型和双高效型品种的百粒重显著高于双低效型品种,产量存在优势。

大量研究表明,在一定施氮范围内,施氮量与作物产量呈正相关关系^[30,31]。相关研究表明,增施氮肥提高吐丝期的营养氮量和吐丝后氮营养的再利用^[32]。齐文增等^[33]研究认为,施用氮肥可显著增加玉米产量,而不同玉米品种之间对氮肥的敏感程度存在差异,氮高效品种较氮低效品种具有较高的产量优势^[34]。本研究表明,随施氮量的增加,不同氮效率玉米品种产量不断增加。中氮条件下,不同品种间产量差异性缩小,分析原因可能是此时作物对氮素的吸收不再是限制作物产量的因素,且光合生产能力强,不同氮效率玉米品种光氮互作均达到平衡。高氮条件下,双高效型和高氮高效型的子粒产量及产量构成因素均高于双低效型品种。前人研究表明,无论高氮高效还是低氮高效品种,其本质均是对氮素供应响应度高,具有较大的物质生产优势^[35]。本研究表明,增施氮肥可提高玉米植株氮素积累量,随施氮量的增加,不同氮效率玉米品种氮素积累量先增加后下降或趋于平稳,同一施氮量下均以双低效型品种氮素积累量最低,且在高氮条件下,双高型和高氮高效型品种的花后氮素积累量较大。秦俭等^[36]研究显示,氮素吸收是物质生产的基础,植物体内干物质积累量影响子粒产量的形成,花前干物质积累是提高花后光合生产能力的基础,而花后较强的光合能力决定了子粒产量。高氮高效型品种各器官干物质积累量较高,具备高产的潜力。相关研究表明,通过施氮协调发展产量构成因素,提高任意一个因素都是增产的重要途径^[37,38]。高氮条件下,氮高效品种子粒库容量较高,库调节能力较强^[39]。本研究表明,高氮条件下双高型和高氮高效型品种的穗粒数、百粒重、有效穗数均高于双低效型品种。

不同施氮水平对4个玉米品种的各性状值具有明显的调控作用,随着施氮水平的增加,4个玉米品种各性状值均显著增加,最终趋于平稳。与双低效型品种相比,低氮高效型品种的特性是在低氮条件下具有较高氮素积累量和干物质积累量,能维持氮胁迫条件下正常的物质合成,增加粒重,进而有较高

产量。高氮高效型品种的特性是在高氮条件下具有较高的花后氮素、干物质积累量,能维持较长时间的光合作用,子粒库容量较高,子粒产量存在优势。双高效型品种同时具有以上特性,既有较高的氮素转运量,又有较高的花后干物质积累量、氮素积累量。

参考文献:

- [1] 张家铜,彭正萍,李 婷,等. 不同供氮水平对玉米体内干物质和氮动态积累与分配的影响[J]. 河北农业大学学报, 2009, 32(2): 1-5.
ZHANG J T, PENG Z P, LI T, et al. Effects of different N application rates on the dynamic accumulation and distribution of assimilate and N content in maize[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2009, 32(2): 1-5. (in Chinese)
- [2] 江立庚,曹卫星. 水稻高效利用氮素的生理机制及有效途径[J]. 中国水稻科学, 2002, 16(3): 261-264.
JIANG L G, CAO W X. Physiological mechanism and approaches for efficient nitrogen utilization in rice[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2002, 16(3): 261-264. (in Chinese)
- [3] 白由路. 植物营养与肥料研究的回顾与展望[J]. 中国农业科学, 2015, 48(17): 3477-3492.
BAI Y L. Review on research in plant nutrition and fertilizers[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(17): 3477-3492. (in Chinese)
- [4] POFFENBARGER H J, BARKER D W, HELMERS M J, et al. Maximum soil organic carbon storage in Midwest U.S. cropping systems when crops are optimally nitrogen-fertilized[J]. PLoS One, 2017, 12(3): 1-17.
- [5] Gallais A, Hirel B. An approach to the genetics of nitrogen use efficiency in maize[J]. Journal of Experimental Botany, 2004, 55(396): 295-306.
- [6] CHEN F J, FANG Z G, GAO Q, et al. Evaluation of the yield and nitrogen use efficiency of the dominant maize hybrids grown in North and Northeast China[J]. Science China. Life Sciences, 2013, 56(6): 552-560.
- [7] 郭 松,曾祥忠,陈 琨,等. 川中丘区玉米氮高效品种筛选及增产潜力分析[J]. 核农学报, 2020, 34(11): 2569-2577.
GUO S, ZENG X Z, CHEN K, et al. Screening of N-efficient maize varieties and analysis for their yield increase potentials in Central Sichuan Basin[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2020, 34(11): 2569-2577. (in Chinese)
- [8] 黄高宝,张 恩,胡恒觉. 不同玉米品种氮素营养效率差异的生态生理机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(3): 293-297.
HUANG G B, ZHANG E, HU H J. Eco-physiological mechanism on nitrogen use efficiency difference of corn varieties[J]. Plant Nutrition and Fertilizing Science, 2001, 7(3): 293-297. (in Chinese)
- [9] 王 艳,米国华,陈范骏,等. 玉米氮素吸收的基因型差异及其与根系形态的相关性[J]. 生态学报, 2003, 23(2): 297-302.
WANG Y, MI G H, CHEN F J, et al. Genotypic differences in nitrogen uptake by maize inbred lines its relation to root morphology[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(2): 297-302. (in Chinese)
- [10] CHEN Y L, XIAO C X, CHEN X C, et al. Characterization of the plant traits contributed to high grain yield and high grain nitrogen concentration in maize[J]. Field Crops Research, 2014, 159: 1-9.
- [11] COQUE M, GALLAIS A. Genetic variation for nitrogen remobilization and post silking nitrogen uptake in maize recombinant inbred lines: heritabilities and correlations among traits[J]. Crop Science, 2007, 47(5): 1787-1796.
- [12] 崔 超,高聚林,于晓芳,等. 不同氮效率基因型高产春玉米花粒期干物质与氮素运移特性的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(6): 1337-1345.
CUI C, GAO J L, YU X F, et al. Dry matter accumulation and nitrogen migration of high-yielding spring maize for different nitrogen efficiency in the flowering and milking stages[J]. Plant Nutrition and Fertilizing Science, 2013, 19(6): 1337-1345. (in Chinese)
- [13] 谢孟林,李 强,查 丽,等. 低氮胁迫对不同耐低氮性玉米品种幼苗根系形态和生理特征的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015(8): 946-953.
XIE M L, LI Q, ZHA L, et al. Effects of low nitrogen stress on the physiological and morphological traits of roots of different low nitrogen tolerance maize varieties at seedling stage[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015(8): 946-953. (in Chinese)
- [14] 杨豫龙. 不同氮效率玉米品种筛选及其在褐土区氮素吸收利用差异[D]. 郑州:河南农业大学, 2020.
- [15] 赵 霞,杨豫龙,王浩然,等. 玉米苗期氮、磷、钾养分吸收利用效率研究[J]. 玉米科学, 2019, 27(4): 154-161, 166.
ZHAO X, YANG Y L, WANG H R, et al. Study on the uptake and utilization efficiency of nitrogen, phosphorus and potassium in maize seedling stage[J]. Journal of Maize Sciences, 2019, 27(4): 154-161, 166. (in Chinese)
- [16] 熊淑萍,吴克远,王小纯,等. 不同氮效率基因型小麦根系吸收特性与氮素利用差异的分析[J]. 中国农业科学, 2016, 49(12): 2267-2279.
XIONG S P, WU K Y, WANG X C, et al. Analysis of root absorption characteristics and nitrogen utilization of wheat genotypes with different N efficiency[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(12): 2267-2279. (in Chinese)
- [17] 丁相鹏,李广浩,张吉旺,等. 控释尿素基施深度对夏玉米产量和氮素利用的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(21): 4342-4354.
DING X P, LI G H, ZHANG J W, et al. Effects of base application depths of controlled release urea on yield and nitrogen utilization of summer maize[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(21): 4342-4354. (in Chinese)
- [18] 蔡 倩,孙占祥,郑家明,等. 辽西半干旱区玉米大豆间作模式对作物干物质积累分配、产量及土地生产力的影响[J]. 中国农业科学, 2021, 54(5): 909-920.
CAI Q, SUN Z X, ZHENG J M, et al. Dry matter accumulation, allocation, yield and productivity of maize-soybean intercropping systems in the semi-arid region of western Liaoning province[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(5): 909-920. (in Chinese)
- [19] 穆心愿,赵 霞,谷利敏,等. 秸秆还田量对不同基因型夏玉米产量及干物质转运的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(1): 29-41.
MU C Y, ZHAO X, GU L M, et al. Effects of straw returning amount on grain yield, dry matter accumulation and transfer in summer maize with different genotypes[J]. Scientia Agricultura Sinica,

- 2020, 53(1): 29–41. (in Chinese)
- [20] 徐 晴, 许甫超, 董 静, 等. 小麦氮素利用效率的基因型差异及相关特性分析[J]. 中国农业科学, 2017, 50(14): 2647–2657.
- XU Q, XU F C, DONG J, et al. Genotypic difference of nitrogen use efficiency of wheat and correlation analysis of the related characters [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(14): 2647–2657. (in Chinese)
- [21] 王 强, 钟旭华, 黄农荣, 等. 光、氮及其互作对作物碳氮代谢的影响研究进展[J]. 广东农业科学, 2006(2): 37–40.
- WANG Q, ZHONG X H, HUANG N R, et al. Interactions of nitrogen with light in the photosynthetic traits and metabolism of carbon and nitrogen of crop[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2006(2): 37–40. (in Chinese)
- [22] 宋 航, 周卫霞, 袁刘正, 等. 光、氮及其互作对玉米氮素吸收利用和物质生产的影响[J]. 作物学报, 2016, 42(12): 1844–1852.
- SONG H, ZHOU W X, YUAN L Z, et al. Effects of light, nitrogen and their interaction on nitrogen absorption, utilization and matter production of maize[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2016, 42(12): 1844–1852. (in Chinese)
- [23] 甄新爱, 黄亚群, 陈景堂, 等. 不同氮效率玉米基因型苗期对光和氮响应的研究[J]. 中国农学通报, 2009, 25(10): 89–95.
- ZHEN X A, HUANG Y Q, CHEN J T, et al. The response of three maize inbred seedling with the different nitrogen use efficiency to light and nitrogen[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(10): 89–95. (in Chinese)
- [24] WU Y W, LI Q, JIN R, et al. Effect of low-nitrogen stress on photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics of maize cultivars with different low-nitrogen tolerances[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18(6): 1246–1256.
- [25] 李 强, 马晓君, 程秋博, 等. 氮肥对不同耐低氮性玉米品种花后物质生产及叶片功能特性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(1): 17–26.
- LI Q, MA X J, CHENG Q B, et al. Effects of nitrogen fertilizer on post-silking dry matter production and leaves function characteristics of low-nitrogen tolerance maize[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(1): 17–26. (in Chinese)
- [26] MU X H, CHEN Q W, CHEN F J, et al. Within-leaf nitrogen allocation in adaptation to low nitrogen supply in maize during grain-filling stage[J]. *Frontiers in plant science*, 2016, 7: 699.
- [27] 春 亮, 陈范骏, 张福锁, 等. 不同氮效率玉米杂交种的根系生长、氮素吸收与产量形成[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(5): 615–619.
- CHUN L, CHEN F J, ZHANG F S, et al. Root growth, nitrogen uptake and yield formation of hybrid maize with different N efficiency [J]. *Plant Nutrition and Fertilizing Science*, 2005, 11(5): 615–619. (in Chinese)
- [28] 李 强, 任 云, 邹 勇, 等. 低氮胁迫下不同氮效率玉米品种的氮代谢与物质生产差异[J]. 西北农业学报, 2021, 30(5): 672–680.
- LI Q, REN Y, ZOU Y, et al. Differences in nitrogen metabolism and dry matter production between maize cultivars and different nitrogen efficiencies under low nitrogen stress[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2021, 30(5): 672–680. (in Chinese)
- [29] 吴雅薇, 蒲 玮, 赵 波, 等. 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, et al. Characteristics of post-anthesis carbon and nitrogen accumulation and trans-location in maize cultivars with different low nitrogen tolerance[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2021, 47(5): 915–928. (in Chinese)
- [30] 张 慧, 赵红香, 温立玉, 等. 黄淮海区域30个夏玉米品种干物质积累和氮素转运特性[J]. 玉米科学, 2016, 24(3): 78–84.
- ZHANG H, ZHAO H X, WEN L Y, et al. Characteristics of dry matter accumulation and nitrogen use efficiency of 30 summer maize hybrids with cluster analysis grouped in Huang-Huai-Hai region [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2016, 24(3): 78–84. (in Chinese)
- [31] 郑 伟, 何 萍, 高 强, 等. 施氮对不同土壤肥力玉米氮素吸收和利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(2): 301–309.
- ZHENG W, HE P, GAO Q, et al. Effect of N application on nitrogen absorption and utilization of spring maize under different soil fertilities[J]. *Plant Nutrition and Fertilizing Science*, 2011, 17(2): 301–309. (in Chinese)
- [32] CHEN Y L, XIAO C X, WU D L, et al. Effects of nitrogen application rate on grain yield and grain nitrogen concentration in two maize hybrids with contrasting nitrogen remobilization efficiency[J]. *European Journal of Agronomy*, 2015, 62: 79–89.
- [33] 齐文增, 陈晓璐, 刘 鹏, 等. 超高产夏玉米干物质与氮、磷、钾养分积累与分配特点[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(1): 26–36.
- 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]. *Plant Nutrition and Fertilizing Science*, 2013, 19(1): 26–36. (in Chinese)
- [34] 陈范骏, 米国华, 刘向生, 等. 玉米氮效率性状的配合力分析[J]. 中国农业科学, 2003, 36(2): 134–139.
- CHEN F J, MI G H, LIU X S, et al. Combination ability analysis of traits related to nitrogen use efficiency in maize[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(2): 134–139. (in Chinese)
- [35] 吴春胜. 超高产玉米灌浆速率与干物质积累特性研究[J]. 吉林农业大学学报, 2008, 30(4): 382–385, 400.
- WU C S. Studies on characteristics of grain filling and dry matter accumulation of super high-yield maize[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2008, 30(4): 382–385, 400. (in Chinese)
- [36] 秦 俭, 杨志远, 孙永健, 等. 不同穗型杂交水稻物质积累、氮素吸收利用和产量的差异比较[J]. 中国水稻科学, 2014, 28(5): 514–522.
- QIN J, YANG Z Y, SUN Y J, et al. Differential comparison of assimilation products accumulation, nitrogen uptake and utilization and grain yield of hybrid indica rice combinations with different panicle types[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2014, 28(5): 514–522. (in Chinese)
- [37] 魏廷邦, 胡发龙, 赵 财, 等. 氮肥后移对绿洲灌区玉米干物质积累和产量构成的调控效应[J]. 中国农业科学, 2017, 50(15): 2916–2927.
- WEI T B, HU F L, ZHAO C, et al. Response of dry matter accumulation and yield components of maize under N-fertilizer postponing

- application in oasis irrigation areas[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(15): 2916–2927. (in Chinese)
- [38] 米国华, 陈范骏, 春 亮, 等. 玉米氮高效品种的生物学特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(1): 155–159.
- MI G H, CHEN F J, CHUN L, et al. Biological characteristics of nitrogen efficient maize genotypes[J]. *Plant Nutrition and Fertilizing Science*, 2007, 13(1): 155–159. (in Chinese)
- [39] 易镇邪, 王 璞, 张红芳, 等. 氮肥类型与施用量对华北平原夏玉米源库关系的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(3): 294–300.
- YI Z X, WANG P, ZHANG H F, et al. Effects of type and application rate of nitrogen fertilizer on source-sink relationship in summer maize in North China Plain[J]. *Plant Nutrition and Fertilizing Science*, 2006, 12(3): 294–300. (in Chinese)
- (责任编辑: 姜媛媛)