

施氮时期对超高产夏玉米产量及氮素吸收利用的影响

吕鹏¹, 张吉旺^{1*}, 刘伟¹, 杨今胜², 刘鹏¹, 董树亭¹, 李登海²

(1 山东农业大学农学院/作物生物学国家重点实验室, 山东泰安 271018; 2 山东登海种业股份有限公司, 山东莱州 261448)

摘要: 选用登海 661 (DH661) 和郑单 958 (ZD958) 为试材, 研究了超高产条件下施氮时期对夏玉米子粒产量、氮素利用率以及转运特性的影响。结果表明, 拔节期一次性施氮较不施氮增产不显著; 随着施氮次数的增加产量显著提高, 灌浆期施氮可以显著提高粒重, 从而提高产量。拔节期、大口期、花后 10 d 按 2:4:4 施氮, DH661 产量可达 14188.9 kg/hm²; 基肥、拔节期、大口期、花后 10 d 按 1:2:5:2 施氮, ZD958 产量可达 14529.6 kg/hm²。生长期内分次施氮及灌浆期施氮可显著提高植株和子粒中氮素积累, 延长氮素积累活跃期; 同时可以显著提高氮素收获指数、氮肥农学利用率、氮素表观回收率和氮肥偏生产力。DH661 和 ZD958 在 2:4:4 和 3:5:2 施肥方式下开花前和开花后氮素吸收比例分别为 51:49 和 60:40。开花前分次施氮可显著提高氮素转运量和转运效率, 灌浆期施氮可显著提高花后子粒氮素同化。DH661 和 ZD958 在 2:4:4 和 3:5:2 施肥方式下花后氮素同化量分别占子粒吸氮量 63.0% 和 50.5%。本试验条件下, DH661 采用拔节期、大口期、花后 10 d 按 2:4:4 施入, ZD958 基肥、拔节期、大口期、花后 10 d 按 1:2:5:2 施入或拔节期、大口期、花后 10 d 按 3:5:2 施入可提高氮素利用率, 实现高产高效。

关键词: 夏玉米; 施氮时期; 产量; 氮素利用

中图分类号: S513.062.01

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2011)05-1099-09

Effects of nitrogen application dates on yield and nitrogen use efficiency of summer maize in super-high yield conditions

LÜ Peng¹, ZHANG Ji-wang^{1*}, LIU Wei¹, YANG Jin-sheng², LIU Peng¹, DONG Shu-ting¹, LI Deng-hai²

(1 College of Agronomy, Shandong Agricultural University/State Key Laboratory of Crop Biology, Taian, Shandong 271018, China; 2 Shandong Denghai Seeds Co., Ltd, Laizhou, Shandong 261448, China)

Abstract: The effects of nitrogen application dates on grain yield, nitrogen translocation and use efficiency were studied under the super-high yield conditions. Denghai661 (DH661) and Zhengdan958 (ZD958) were selected experimental materials. The results show that the grain yield was not increased significantly under the single nitrogen application at the jointing stage, while the yields of two cultivars are increased significantly with the increase of nitrogen application times. Nitrogen application at the grain filling stage could increase weight of kernels significantly. The grain yield of DH661 is 14188.9 kg/ha, when the nitrogen fertilizers are applied at the jointing, male tetrad and grain filling stages, and the ratio is 2:4:4. The grain yield of ZD958 is 14529.6 kg/ha, when the nitrogen fertilizers are applied as the base fertilizer, and at the jointing, male tetrad and grain filling stages and the ratio is 1:2:5:2. Nitrogen accumulation amounts in the plant and grain, nitrogen harvest index, nitrogen agronomic efficiency, nitrogen recovery efficiency and nitrogen partial factor productivity are increased significantly with nitrogen application times and nitrogen application at the grain filling stage, and the active nitrogen accumulation period is prolonged. The ratio of nitrogen accumulation amounts before and after anthesis for DH661 is 51:49 by supplying

收稿日期: 2010-11-23

接受日期: 2011-03-24

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2009CB118602); 公益性行业(农业)科研专项(201103003); 山东省现代农业产业技术体系项目资助。

作者简介: 吕鹏(1985—), 男, 山东滨州人, 硕士研究生, 主要从事作物高产生理生态研究。E-mail: bestlvpeng@163.com

* 通讯作者 E-mail: jwzhang@sdau.edu.cn

nitrogen at the jointing stage (20%), male tetrad stage (40%) and grain filling stage (40%), while the ration for ZD958 is 60:40 for by supplying nitrogen at the jointing stage (30%), male tetrad stage (50%) and grain filling stage (20%). Nitrogen application several times before the anthesis stage could increase nitrogen translocation amount and nitrogen translocation efficiency, and nitrogen application at the silking stage could increase the assimilated amount of nitrogen in grain after anthesis. Through supplying nitrogen at the jointing stage (20%), male tetrad stage (40%) and grain filling stage (40%), the assimilated amount of nitrogen after anthesis is 63.0% of nitrogen accumulation amount in grain for DH661. Through supplying nitrogen at the jointing stage (30%), male tetrad stage (50%) and grain filling stage (20%), the assimilated amount of nitrogen after anthesis is 50.5% in grain for ZD958. In conclusion, under this field experiment conditions, as far as grain yield and nitrogen use efficiency are concerned, the jointing stage (20%), male tetrad stage (40%) and grain filling stage (40%) for DH661 and base fertilizer(10%), jointing stage (20%), male tetrad stage (50%) and grain filling stage (20%) for ZD958 are the most optimal nitrogen application stages and ratios.

Key words: summer maize (*Zea mays* L.); nitrogen application date; yield; nitrogen use efficiency

氮是夏玉米必需的营养元素,也是产量最重要的养分限制因子^[1-2]。由于玉米兼具增产潜力大和耐肥性强的特点,我国玉米生产中氮肥超量施用十分严重。2004年我国玉米农田氮素利用率仅为26.1%^[3]。用高氮投入换取高产出的生产方式既造成了资源浪费,又造成环境污染^[4]。但是,提高玉米单产是保证国家粮食安全的重要途径^[5],因此,对高产夏玉米进行科学的氮肥管理势在必行^[6-7]。

对于一般生产田氮肥运筹对夏玉米产量和氮素利用的影响已有大量报道^[8-9]。据报道,拔节期追施氮肥可以显著提高产量和氮素利用率^[10-11];吐丝期追氮可以显著提高粒重和子粒粗蛋白含量^[12-13]。氮素利用率随追氮比例增大而提高,基追比1:2较2:1的氮素利用率提高2倍多^[14]。超高产条件下,夏玉米的养分累积趋势基本呈“直线”型,而一般生产田氮素累积曲线呈“S”型;3次施肥(苗肥期30%+大喇叭口期30%+吐丝期40%)较一次性施肥和2次施肥(苗肥50%+大喇叭口期50%)可以显著提高产量和肥料利用率^[15-16]。目前普遍认为,分次施氮可以提高玉米产量及肥料利用率,但所报道的氮肥施用时期和比例不一^[17-18]。

黄淮海区域是我国重要的夏玉米生产区。自1998年至2010年,山东省莱州已13次达到15000 kg/hm²以上的超高产水平^[19],自2007年山东省夏玉米产量超过15000 kg/hm²的地块越来越多,但却普遍存在氮肥施用过量的现象。该生态区夏玉米氮素利用率仅10%左右^[20-21]。同时当地习惯拔节期一次性施肥,这更不利于产量和肥料利用率的提高。

目前,有关超高产夏玉米生产技术研究较少^[22-23],对于高产条件下氮肥运筹方式对夏玉米产

量和氮素利用的影响也鲜见报道。为此,本试验在高产地块选用高产耐密品种,不改变总施氮量,通过调节各时期的追施比例,旨在探明高产条件下适宜的施氮方式,以期对玉米高产高效生产技术提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

2008~2009年,在山东农业大学试验农场进行两年定位试验。2008、2009年降水量477.1、459.1 mm,平均气温22.4、23.8℃,日照时数770.5、813.0 h。前茬作物为冬小麦。土壤为棕壤,其0—20 cm土层基础肥力分别为:有机质含量8.81、9.21 g/kg,全氮0.87、0.94 g/kg,碱解氮86.9、86.9 mg/kg,速效磷52.65、57.43 mg/kg,速效钾129.42、113.45 mg/kg。

试验设6个处理(表1),3次重复,随机排列。供试品种为郑单958(ZD958)和登海661(DH661)。6月12日播种,10月5日收获,足墒播种,全生育期无灌溉。种植密度75000株/hm²,等行距种植,行距60 cm,小区面积100 m²。施氮量N 360 kg/hm²(尿素含N 46%);各处理均施P₂O₅ 120 kg/hm²(过磷酸钙857 kg/hm²)、K₂O 240 kg/hm²(氯化钾400 kg/hm²),分别于播种前、拔节期各施入50%。管理措施参照山东省地方标准《超级玉米高产栽培技术规程》(DB37/T 1184-2009)。超高产栽培条件下,紧凑型中晚熟杂交种全生育期积温应为2500~3200℃,日照时数为800 h左右^[23]。试验地点气候条件及管理措施均可达到超高产水平。

1.2 测定项目及方法

各处理分别于拔节期(V6)、大喇叭口期(V12)、

表 1 施氮时期及施氮比例 (%)
Table 1 N application stages and ratios

处理 Treatment	基肥 Basal	追肥 Topdressing		
		拔节期 V6	10 叶期 V10	开花后 10 d 10 DAA
T1	0	0	0	0
T2	0	100	0	0
T3	0	40	60	0
T4	0	30	50	20
T5	0	20	40	40
T6	10	20	50	20

注(Note): V6—Vegetative sixth leaf; V10—Vegetative tenth leaf; DAA—Days after anthesis

抽雄期(VT)、开花后 14、28、42 d、成熟期(R6)取长势均匀一致的植株 5 株,拔节期地上部整株保存,大喇叭口期和抽雄期植株分为叶片、茎鞘,开花后植株分为叶片、茎鞘、子粒,105℃杀青,75℃烘干至恒重,称重后磨粉备用。

成熟期,每小区收获玉米 3 行,共 30 个果穗,调查穗部性状,测定出子率和含水率,计算实际产量(按 14% 折算含水率)。

土壤基础肥力按常规方法测定。植株及子粒全氮含量采用半微量凯氏定氮法测定^[24]。

1.3 参数计算

植株总氮素积累量(TNAA, kg/hm²) = 成熟期单株干重 × 小区植株密度 × 成熟期单株含氮量(%)^[16];

氮素收获指数(NHI, %) = 子粒吸氮量/植株吸氮量 × 100^[16];

氮肥农学利用率(NAE, kg/kg) = (施氮区子粒产量 - 无氮区子粒产量)/施氮量^[16];

氮素表观回收率(NRE, %) = (施氮区氮素吸收量 - 无氮区氮素吸收量)/施氮量 × 100^[16];

氮肥偏生产力(NFP, kg/kg) = 施氮区产量/施氮量^[16];

营养器官氮素转运量(NTA, kg/hm²) = 开花期营养器官氮素积累量 - 成熟期营养器官氮素积累量^[25];

氮素转运效率(NTE, %) = 营养器官氮素转运量/开花期营养器官氮素积累量 × 100^[25];

氮素贡献率(NCP, %) = 营养器官氮素转运量/成熟期子粒氮素积累量 × 100^[25];

开花后氮素同化量(AANAA, kg/hm²) = 成熟期子粒氮素积累量 - 营养器官氮素转运量^[25]。

1.4 氮素积累过程模拟

玉米氮素吸收总量可用 Logistic 方程表达^[26],其方程模拟的相关系数 r 值均达到极显著水平,表明该方程能真实地反映玉米植株氮素积累过程。以出苗后天数(x)为自变量,各生育期氮素积累量为因变量(y),通过 Logistic 方程 $y = a/(1 + be^{-cx})$,进行模拟。

最大速率出现天数(Date of HAR, d) = $(\ln b - \ln 1)/c$;

最大速率时生长量(W) = $a/2$;

养分吸收最大速率[HAR, kg/(hm² · d)] = $(c \times W) \times [1 - (W/a)]$;

氮素积累活跃期(ANAP, d) = $6/c$ 。

试验数据采用 DPS7.05 和 Microsoft Excel 2003 进行统计分析。Logistic 方程用 CurveExpert1.3 拟合。

2 结果与分析

2.1 施氮时期对夏玉米产量的影响

施氮时期显著影响产量。方差分析表明,施氮时期 $F = 269.94$, 品种 $F = 27.48$, 品种 × 施氮时期 $F = 10.3639$, 均达显著或极显著水平;但年度间、年度 × 品种、年代 × 施氮时期差异不显著。表 2 看出,施氮可以显著提高穗粒数、千粒重和子粒产量,2 年试验结果趋势一致。随着施肥次数的增加,玉米产量显著提高,2 年试验平均,DH661 在 T5 处理下产量达到最高,较 T1、T2、T3 分别提高 15.7%、14.5% 和 8.2%; ZD958 在 T6 处理子粒产量达到最大,较 T1、T2、T3 分别提高 21.6%、17.5% 和 6.4%。开花前分次追氮显著提高穗粒数,DH661 在 T4 处理下穗粒数较 T1 和 T2 分别提高 5.9% 和 5.6%; ZD958 在 T6 处理下穗粒数较 T1 和 T2 分别提高 10.2% 和 8.8%。两品种 T5 处理都较 T1 和 T2 显著提高千粒重,DH661 提高了 10.1% 和 9.2%, ZD958 提高了 10.9% 和 8.4%; T2 较 T1 增产不显著。

2.2 施氮时期对夏玉米氮素积累的影响

玉米生育期内,施氮处理氮素积累量显著高于不施氮处理;随着施肥次数的增加植株氮素积累量显著增加。收获期 DH661 在 T5 处理下氮素总积累量达到最大,较 T1、T2 分别提高 15.3% 和 7.3%; ZD958 的变化趋势相似,在 T4 和 T6 处理下氮素总积累量显著高于其他处理(表 3)。

利用 Logistic 方程对氮素积累过程进行模拟,得到氮素积累特性参数。表 4 看出,施氮可以显著提

表 2 施氮时期对夏玉米子粒产量及产量构成的影响

Table 2 Effects of nitrogen application stages on grain yield and yield components of summer maize

品种 Cultivar	处理 Treatment	2008yr			2009yr		
		穗粒数 kernels (No./ear)	千粒重 1000-grain wt. (g)	产量 Grain yield (kg/hm ²)	穗粒数 kernels (No./ear)	千粒重 1000-grain wt. (g)	产量 Grain yield (kg/hm ²)
DH661	T1	449.3 b	359.0 b	12097.4 c	448.9 b	368.8 b	12306.5 d
	T2	449.6 b	363.2 b	12247.1 c	450.4 b	371.0 b	12428.7 d
	T3	459.2 ab	372.7 ab	12835.8 b	470.1 a	376.3 b	13250.4 c
	T4	474.0 a	387.4 a	13772.1 a	476.8 a	380.7 ab	13588.8 b
	T5	471.4 a	397.6 a	14057.1 a	469.6 a	404.0 a	14188.9 a
	T6	470.8 a	393.5 a	13894.5 a	465.9 ab	404.3 a	14103.3 a
ZD958	T1	477.6 b	327.8 b	11741.8 d	499.7 b	324.3 c	12129.9 d
	T2	480.7 a	340.4 b	12272.3 c	509.2 b	326.9 c	12447.3 d
	T3	520.1 a	350.2 ab	13660.4 b	520.7 ab	349.3 b	13631.1 c
	T4	530.8 a	361.6 a	14395.3 a	533.1 a	356.2 ab	14201.8 b
	T5	525.3 a	361.4 a	14238.3 a	517.4 b	361.9 a	14022.5 b
	T6	533.5 a	362.5 a	14504.5 a	543.4 a	357.1 a	14529.6 a

注(Note): 不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Different letters among treatments mean significant at 5% level.

表 3 施氮时期对夏玉米氮素积累的影响(kg/hm², 2009)

Table 3 Effects of nitrogen application stages on nitrogen accumulation

品种 Cultivar	生育时期 Growth stage	处理 Treatments					
		T1	T2	T3	T4	T5	T6
DH661	V6	28.2 b	29.0 b	29.2 b	29.4 b	29.0 b	33.4 a
	V12	90.7 d	91.3 d	92.1 d	100.5 b	94.3 c	128.5 a
	VT	185.9 d	197.9 c	212.8 b	240.4 a	209.4 bc	233.9 a
	花后 14 d 14 DAA	217.8 c	245.5 b	259.3 a	269.4 a	268.8 a	256.7 a
	花后 28 d 28 DAA	242.0 c	256.7 c	261.5 c	282.8 b	293.7 ab	301.2 a
	花后 42 d 42 DAA	248.7 d	260.2 cd	264.5 c	336.5 b	347.1 a	328.9 b
	R6	285.7 d	320.1 c	341.9 b	373.2 c	407.6 a	390.5 b
ZD958	V6	26.0 b	26.4 b	25.7 b	26.2 b	26.2 b	31.0 a
	V12	102.1 b	110.0 b	116.5 b	115.9 b	108.7 b	140.5 a
	VT	203.6 d	216.3 c	229.9 b	228.0 b	226.9 b	244.2 a
	花后 14 d 14 DAA	218.4 c	224.7 c	239.5 bc	247.0 b	265.1 a	246.7 b
	花后 28 d 28 DAA	228.2 c	244.1 b	254.0 b	270.5 a	289.8 a	288.4 a
	花后 42 d 42 DAA	245.2 c	293.1 b	324.8 a	332.4 a	320.8 a	330.2 a
	R6	269.2 d	303.0 c	334.3 b	378.4 a	364.9 a	375.6 a

注(Note): 不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Different letters among treatments mean significant at 5% level. V6—拔节期 Vegetative sixth leaf; V12—大喇叭口期 Vegetative twelfth leaf; VT—抽雄期 Vegetative tasseling; R6—成熟期 physiological maturity; DAA—Days after anthesis.

表 4 施氮时期对夏玉米氮素积累特征参数(2009)
Table 4 Logistic analysis of nitrogen accumulation in maize

品种 Cultivar	特征参数 Characteristic parameter	处理 Treatments					
		T1	T2	T3	T4	T5	T6
DH661	r	0.989	0.991	0.972	0.976	0.985	0.978
	养分吸收最大速率[$\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$] HAR	6.09 d	7.48 b	7.87 a	7.27 c	6.06 d	5.74 e
	最大速率出现天数(d) Date of HAR	31.23 d	30.67 e	31.07 d	33.30 c	41.14 a	35.69 b
	氮素积累活跃期(d) ANAP	64.68 d	55.12 e	55.82 e	70.51 c	97.24 a	96.18 b
ZD958	r	0.987	0.976	0.968	0.971	0.984	0.968
	养分吸收最大速率[$\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$] HAR	7.70 a	6.50 c	6.23 c	5.40 d	7.07 b	5.67 d
	最大速率出现天数(d) Date of HAR	27.42 d	29.81 cd	31.80 c	37.64 a	33.22 b	33.31 b
	氮素积累活跃期(d) ANAP	47.83 e	65.06 d	75.59 c	100.82 a	71.02 c	93.25 b

注(Note): r —Simulation degree; HAR—The highest absorption rate; ANAP—Active N accumulation period. 不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Different letters among treatments mean significant at 5% level.

高氮素最大吸收速率。DH661 和 ZD958 分别在 T4、T5 处理达到养分吸收最大速率。追施花粒肥的 T4、T5、T6 处理推迟了最大速率出现天数,同时显著延长了氮素积累活跃期。

2.3 施氮时期对氮素利用率的影响

两年试验平均,氮素收获指数 DH661 在 T5 处理显著高于其他处理;ZD958 在 T3、T4 处理显著高于 T1,其他处理间差异不显著。氮素农学利用率、氮素表观回收率和氮肥偏生产力随着追氮次数的增

加显著提高。DH661 在 T5 处理下氮素农学利用率较 T2 和 T3 分别提高了 1303.4% 和 128.5%;氮素表观回收率较 T2 和 T3 分别提高了 23.6% 和 18.0%;氮肥偏生产力较 T2 和 T3 分别提高了 14.5% 和 8.1%。ZD958 在 T6 处理下氮素农学利用率较 T2 和 T3 分别提高了 510.2% 和 50.9%;氮素表观回收率较 T2 和 T3 分别提高了 23.7% 和 13.5%,氮肥偏生产力较 T2 和 T3 分别提高了 17.5% 和 6.5% (表 5)。

表 5 施氮时期对夏玉米氮素利用率的影响
Table 5 Effects of nitrogen application stages on nitrogen utilization efficiency of summer maize

品种 Cultivar	处理 Treatment	2008 yr				2009 yr			
		氮素收获 指数 NHI	氮肥农学 利用率 NAE (kg/kg)	氮素表观 回收率 NRE (%)	氮肥偏 生产力 NPPF (kg/kg)	氮素收获 指数 NHI	氮肥农学 利用率 NAE (kg/kg)	氮素表观 回收率 NRE (%)	氮肥偏 生产力 NPPF (kg/kg)
DH661	T1	62.04 c				61.7 bc			
	T2	59.26 d	0.42 e	8.99 e	34.0 c	58.9 c	0.34 d	9.56 e	34.5 b
	T3	63.96 c	2.05 d	14.13 d	35.7 b	59.5 c	2.62 c	15.61 e	36.8 b
	T4	67.98 b	4.65 c	22.86 c	38.3 a	65.7 b	3.56 b	24.31 d	37.7 a
	T5	70.15 a	5.44 a	31.85 a	39.0 a	71.0 a	5.23 a	33.86 a	39.4 a
	T6	65.84 bc	4.99 b	27.38 b	38.6 a	69.6 a	4.99 a	29.11 b	39.2 a
ZD958	T1	59.71 c				67.2 b			
	T2	70.82 a	1.47 e	8.83 c	34.1 c	73.0 a	0.88 e	9.39 d	34.6 c
	T3	67.64 b	5.33 d	20.71 b	37.9 b	71.6 ab	4.17 d	18.08 c	37.9 b
	T4	67.20 b	7.37 b	32.72 a	40.0 a	71.1 ab	5.76 b	30.33 a	39.4 a
	T5	70.92 a	6.93 c	29.04 a	39.6 a	68.6 b	5.26 c	26.58 b	38.9 ab
	T6	69.47 a	7.67 a	31.96 a	40.3 a	68.7 b	6.67 a	29.56 a	40.4 a

注(Note): NHI—N harvest index; NAE—N agronomic efficiency; NRE—N recovery efficiency; NPPF—N partial factor productivity. 不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Different letters among treatments mean significant at 5% level.

2.4 施氮时期对氮素转运的影响

随着施氮次数的增加和花粒期施氮量的加大,子粒成熟期氮素积累量显著提高,DH661 在 T5 处理下子粒氮素总积累量较 T1、T2、T3 分别提高 62.8%、52.1%、36.8%。开花前分次施氮显著提高营养的氮素转运量,同时显著提高了花前氮素转运效率及对子粒贡献率,DH661 在 T3 处理下氮素转运量达到最大,显著高于其他处

理。花粒期追氮显著提高了子粒中花后氮素同化量,DH661 在 T5 处理下花后氮素同化量达到最大,较 T1、T2、T3 分别提高 118.3%、73.1%、63.8%。ZD958 各处理同 DH661 变化趋势一致。T4 子粒含氮量显著高于其他处理,T3 氮素转运量显著高于其他处理。T4 处理下花后氮素同化量达到最大,较 T1、T2、T3 分别提高 164.3%、95.0%、48.3% (表 6)。

表 6 不同施氮时期下花后氮素向子粒中的转移和对子粒的贡献

Table 6 N translocation and contribution to grain after anthesis under different N application stages

年份 Year	项目 Item	品种 Cultivar	处理 Treatments						
			T1	T2	T3	T4	T5	T6	
2008	成熟期子粒含氮量(kg/hm ²)	DH661	166.7 e	178.4 d	204.4 c	238.6 b	268.9 a	241.8 b	
	NAAG	ZD958	151.1 d	201.7 c	221.6 b	249.2 a	253.6 a	255.7 a	
	氮素转运量(kg/hm ²)	DH661	83.9 d	75.2 e	97.6 c	128.0 a	95.0 c	108.0 b	
	NTA	ZD958	101.7 c	133.2 a	123.9 b	106.4 c	122.9 b	131.8 a	
	花后氮素同化量(kg/hm ²)	DH661	82.8 e	103.2 d	106.8 cd	110.6 c	173.9 a	133.4 b	
	AANAA	ZD958	49.4 e	68.5 d	97.7 c	142.8 a	130.7 b	123.9 b	
	氮素转运效率(%)	DH661	45.1 b	38.0 c	45.9 b	53.2 a	45.3 b	46.4 b	
	NTE	ZD958	49.9 bc	61.6 a	53.9 b	46.7 c	54.2 b	54.0 b	
	氮素转运对子粒贡献率(%)	DH661	50.3 a	42.2 b	47.8 ab	53.6 a	35.3 c	44.8 b	
	NCP	ZD958	67.3 a	66.0 a	55.9 b	42.7 d	48.5 c	51.5 bc	
	2009	成熟期子粒含氮量(kg/hm ²)	DH661	176.1 d	188.5 d	203.5 d	245.4 c	289.3 a	271.8 b
		NAAG	ZD958	181.0 e	221.2 d	239.4 c	269.2 a	250.4 c	258.2 b
氮素转运量(kg/hm ²)		DH661	95.7 c	85.9 d	92.8 c	131.3 a	107.0 b	130.0 a	
NTA		ZD958	124.8 c	146.7 a	149.2 a	133.2 b	123.7 c	139.1 b	
花后氮素同化量(kg/hm ²)		DH661	80.4 e	102.6 d	110.7 c	114.1 c	182.4 a	141.8 b	
AANAA		ZD958	56.1 f	74.5 e	90.3 d	136.0 a	126.6 b	119.2 c	
氮素转运效率(%)		DH661	51.5 b	43.4 c	43.6 c	54.6 a	51.1 b	55.6 a	
NTE		ZD958	61.3 bc	67.8 a	64.9 b	58.4 c	54.5 d	56.9 cd	
氮素转运对子粒贡献率(%)		DH661	54.4 a	45.6 b	45.6 b	53.5 a	37.0 c	47.8 b	
NCP		ZD958	69.0 a	66.3 b	62.3 c	49.5 e	49.4 e	53.9 d	

注(Note): NAAG—N accumulation amount of grain; NTA—N translocation amount; AANAA—Assimilated amount of nitrogen after anthesis; NTE—N translocation efficiency; NCP—N contribution proportion. 不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Different letters among treatments mean significant at 5% level.

3 讨论

3.1 施氮时期对产量的影响

2002 年美国 Iowa 州 Francis Childs 创造的单季玉米产量纪录为 27754.5 kg/hm²[27]。2006、2007 年

美国玉米高产竞赛中所有级别前三名平均产量分别为 17297.2、18749.5 kg/hm², 平均施氮量为 284.5 kg/hm²、300 kg/hm², 播种前施肥占 51.85%, 全生育期多次追肥, 有的多达 7 次^[28-29]。我国高产田对粮食总产的贡献率为 54.1%, 发展超高产是提高单

产和实现未来中国粮食安全的基本技术途径^[30]。高产田较一般生产田需要更高的投入。前人关于施氮量对夏玉米产量的影响多集中于一般大田水平,报道的适宜施氮量多为 N 125 kg/hm²,其产量水平不超过 9000 kg/hm²^[8-9]。一般生产田适宜的施氮量无法实现产量 12000 kg/hm² 以上的产量水平。因此,研究适宜的施氮方式,可为玉米高产高效生产提供科学依据。

玉米生产百公斤子粒需要 2.5 kg 氮素^[31]。本试验以高产为前提,在 360 kg/hm² 施氮量下,DH661 拔节期、大口期、灌浆期按 2:4:4 和 ZD958 基肥、拔节期、大口期、灌浆期按 1:2:5:2 施肥产量可以达到 14000 kg/hm² 以上;而按照当地习惯,拔节期氮素一次性施入产量水平与不施氮处理产量无显著差异。因此,在高产条件下对氮素进行精确管理,保证开花前氮素供应前提下,适当增施花粒肥,可提高产量和氮素利用效率。

3.2 施氮时期对氮素吸收的影响

王启现^[32]研究指出,氮肥分次追施较一次性施入可以减轻淋洗和反硝化造成的损失。而有研究认为,玉米生育期内分期施氮会在收获后造成土壤残留的硝态氮淋洗,污染环境^[33-34]。本研究表明,DH661 和 ZD958 按 2:4:4 和 1:2:5:2 施氮肥模式,不仅显著提高植株氮素积累量,也显著提高了氮素农学利用率、氮素表观回收率、氮肥偏生产力和氮素收获指数。王永军^[35]研究指出,超高产栽培模式下开花前后氮素吸收比例为 48:52;传统栽培模式下开花前后氮素吸收比例为 76:24。也有研究认为,当代高产品种抽丝后植株吸收的氮占总量的 60% 以上时,生育后期缺氮显著降低产量和氮素积累量^[36]。通过 Logitsc 方程对氮素积累过程进行模拟可以看出,分次施氮较一次性施氮可提高 DH661 氮素吸收最大速率,ZD958 处理之间氮素吸收最大速率差异不显著。追施花粒肥推迟了最大速率的出现时间,显著延长了植株氮素吸收活跃期,促进了植株对氮素的吸收,延缓了植株衰老。DH661 在 2:4:4 的氮肥处理下开花前后氮素吸收比例为 51:49,ZD958 在 3:5:2 和 1:2:5:2 氮肥处理下开花前后氮素吸收比例分别为 60:40 和 65:35。两品种吸氮特性存在差异,其原因在于两品种开花期虽一致,但 DH661 属中晚熟品种,花后叶片保绿性好,灌浆期较 ZD958 延长。由于子粒需氮是玉米灌浆期氮素吸收的主要动力^[14],因此,DH661 较 ZD958 相比应适当加大灌浆期氮肥投入,保证灌浆期必要的氮素

供应。

3.3 施氮时期对子粒氮素转移和同化的影响

Osaki 等^[37-38]指出,子粒中的氮一部分来自于抽雄前茎和叶中积累氮素再转移,另一部分则来源于花后根系直接供应。因此,在保证花前氮素转移的同时,应增施花粒肥以促进子粒氮素吸收同化。本研究看出,随着施肥次数的增加和追施花粒肥,子粒中氮素积累量显著提高。苗肥、穗肥按 4:6 施入的施肥方式显著提高花前氮素转运量和转运效率,但显著降低了花后氮素同化量,不利于子粒中氮素积累。DH661 和 ZD958 追施花粒肥显著提高了子粒中花后氮素同化量,同时促进了花前氮素向子粒中的转移,提高了转运效率。DH661 按 2:4:4 施氮,花后子粒氮素同化量占子粒含氮量 63.0%;ZD958 按 3:5:2 施氮,花后子粒氮素同化量占子粒含氮量 50.5%。因此,合理的施肥方式可充分调节花前氮素转移以及花后氮素直接同化。

灌浆期是玉米子粒形成的关键时期,也是植株对氮素吸收转运的重要时期。前人对于分次施肥的研究报道多为一般生产大田^[8-14],对于当代超高产玉米品种花后需氮特性报道不多。本研究表明,综合考虑产量、植株和子粒对氮素的吸收利用及转运,采用分次施肥,适量灌浆期施氮可以显著提高产量和氮素利用率;促进花前氮素向子粒转运和花后子粒氮素同化。但是不同施氮方式下品种间产量存在差异,即当代超高产品种的生理特性差异使其具有各自最适的施氮方式。本试验仅探讨了不同施肥方式对产量和氮素利用的影响,其生理生化机制需进一步研究。

参考文献:

- [1] Ferguson R B, Hergert G W, Schepers J S *et al.* Site-specific nitrogen management of irrigated maize: Yield and soil residual nitrate effects [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2002, 66: 544-553.
- [2] Samonte S O P B, Wilson L T, Medley J C *et al.* Nitrogen utilization efficiency: Relationships with grain yield, grain protein, and yield-related traits in rice [J]. *Agron. J.*, 2006, 98: 168-176.
- [3] Ma W Q, Li J H, Ma L *et al.* Nitrogen flow and use efficiency in production and utilization of wheat, rice, and maize in China [J]. *Agric. Syst.*, 2009, 99: 53-63.
- [4] Guo J H, Liu X J, Zhang Y *et al.* Significant acidification in major Chinese croplands [J]. *Science*, 2010, 327(5968): 1008-1010.
- [5] 李少昆. 当前玉米生产中存在的主要问题与对策[J]. *中国农业信息*, 2008, (6): 37-38.

- Li S K. Main problems and countermeasures on maize production at present [J]. *China Agric. Inform.*, 2008, (6): 37–38.
- [6] Hawkins J A, Sawyer J E, Barker D W, Lundvall J P. Using relative chlorophyll meter values to determine nitrogen application rates for corn [J]. *Agron. J.*, 2007, 99: 1034–1040.
- [7] Zhang J, Alfred M B, Jason W, Kenneth J. Sensitivity of chlorophyll meters for diagnosing nitrogen deficiencies of corn in production agriculture [J]. *Agron. J.*, 2008, 100: 543–550.
- [8] 易镇邪, 王璞, 申丽霞, 等. 不同类型氮肥对夏玉米氮素累积、转运与氮肥利用的影响[J]. *作物学报*, 2006, 32(5): 772–778.
Yi Z X, Wang P, Shen L X *et al.* Effects of different types of nitrogen fertilizer on nitrogen accumulation, translocation and nitrogen fertilizer utilization in summer maize [J]. *Acta Agron. Sin.*, 2006, 32(5): 772–778.
- [9] 赵营, 同延安, 赵护兵. 不同供氮水平对夏玉米养分累积、转运及产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(5): 622–627.
Zhao Y, Tong Y A, Zhao H B. Effects of different N rates on nutrients accumulation, transformation and yield of summer maize [J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2006, 12(5): 622–627.
- [10] Randall G W, Vetsch J A, Huffman J R. Corn production on a subsurface-drained mollisol as affected by time of nitrogen application and nitrapyrin [J]. *Agron. J.*, 2003, 95: 1213–1219.
- [11] Fox R H, Kern J M, Piekielek W P. Nitrogen fertilizer source, and method and time of application effects on no-till corn yields and nitrogen uptake [J]. *Agron. J.*, 1986, 78: 741–746.
- [12] 王启现, 王璞, 王伟东, 鲁来清. 吐丝期施氮对夏玉米粒重和子粒粗蛋白的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2002, 7(1): 59–64.
Wang Q X, Wang P, Wang W D, Lu L Q. Effect of additional N supplied at silking on 1000-grain weight and grain crude protein content of summer corn [J]. *J. China Agric. Univ.*, 2002, 7(1): 59–64.
- [13] 赵士诚, 裴雪霞, 何萍, 等. 氮肥减量后移对土壤氮素供应和夏玉米氮素吸收利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(2): 492–497.
Zhao S C, Pei X X, He P *et al.* Effects of reducing and postponing nitrogen application on soil N supply plant N uptake and utilization of summer maize [J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2010, 16(2): 492–497.
- [14] 易镇邪, 王璞, 陶洪斌, 等. 氮肥基追比对华北平原夏玉米生长发育与水、氮利用的影响 II. 夏玉米氮素累积、转运与土壤无机氮动态[J]. *中国生态农业学报*, 2008, 16(1): 86–90.
Yi Z X, Wang P, Tao H B *et al.* Effect of base N to dress N ratio on water and nitrogen utilization, growth of summer maize in North China Plain II. Nitrogen accumulation and translocation of summer maize and dynamics of soil inorganic N [J]. *Chin. J. Eco-Agric.*, 2008, 16(1): 86–90.
- [15] 王宜伦, 李潮海, 何萍, 等. 超高产夏玉米养分限制因子及养分吸收积累规律研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(3): 559–566.
Wang Y L, Li C H, He P *et al.* Nutrient restrictive factors and accumulation of super-high-yield summer maize [J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2010, 16(3): 559–566.
- [16] 王宜伦, 李潮海, 谭金芳, 等. 超高产夏玉米植株氮素累积特征及一次性施肥效果研究[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(15): 3151–3158.
Wang Y L, Li C H, Tan J F *et al.* Studies on plant nitrogen accumulation characteristics and the effect of single application of base fertilizer on super-high-yield summer maize [J]. *Sci. Agric. Sin.*, 2010, 43(15): 3151–3158.
- [17] 鱼欢, 杨改河, 王之杰. 不同施氮量及基追比例对玉米冠层生理性状和产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(2): 266–273.
Yu H, Yang G H, Wang Z J. Nitrogen rate and timing considerations on yield and physiological parameters of corn canopy [J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2010, 16(2): 266–273.
- [18] 李宗新, 董树亭, 王空军, 等. 不同肥料运筹对夏玉米田间土壤氮素淋溶与挥发影响的原位研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(6): 998–1005.
Li Z X, Dong S T, Wang K J *et al.* In situ study on influence of different fertilization strategies for summer maize on soil nitrogen leaching and volatilization [J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2007, 13(6): 998–1005.
- [19] 黄振喜, 王永军, 王空军, 等. 产量 15000 kg/ha 以上夏玉米灌浆期间的的光合特性[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(9): 1898–1906.
Huang Z X, Wang Y J, Wang K J *et al.* Photosynthetic characteristics during grain filling stage of summer maize hybrids with high yield potential of 15000 kg/ha [J]. *Sci. Agric. Sin.*, 2007, 40(9): 1898–1906.
- [20] 吴永成, 周顺利, 王志敏, 罗延庆. 华北地区夏玉米土壤硝态氮的时空动态与残留[J]. *生态学报*, 2005, 25(7): 1620–1625.
Wu Y C, Zhou S L, Wang Z M, Luo Y Q. Dynamics and residue of soil nitrate in summer maize field of North China [J]. *Acta Ecol. Sin.*, 2005, 25(7): 1620–1625.
- [21] 王启现, 王璞, 申丽霞, 等. 施氮时期对玉米土壤硝态氮含量变化及氮盈亏的影响[J]. *生态学报*, 2004, 24(8): 1582–1588.
Wang Q X, Wang P, Shen L X *et al.* Effect of nitrogen application time on dynamics of nitrate content and apparent nitrogen budget in the soil of summer maize fields [J]. *Acta Ecol. Sin.*, 2004, 24(8): 1582–1588.
- [22] 谢瑞芝, 李潮海, 周苏玫, 张根峰. 超高产夏玉米生长机制研究[J]. *河南农业大学学报*, 1999, 3(1): 11–16.
Xie R Z, Li C H, Zhou S M, Zhang G F. Study on growth mechanism of super-high yield summer maize [J]. *J. Henan Agric. Univ.*, 1999, 3(1): 11–16.
- [23] 李潮海, 苏新宏, 谢瑞芝, 等. 超高产栽培条件下夏玉米产量与气候生态条件关系研究[J]. *中国农业科学*, 2001, 34(3): 311–316.
Li C H, Su X H, Xie R Z *et al.* Study on relationship between

- grain-yield of summer corn and climatic ecological condition under super-high-yield cultivation [J]. *Sci. Agric. Sin.*, 2001, 34(3): 311-316.
- [24] 何照范. 粮油子粒品质及其分析技术[M]. 北京: 农业出版社, 1985. 31-41, 57-59.
- He Z F. Analysis technique for grain quality of cereals and oils [M]. Beijing: Agricultural Press, 1985. 31-41, 57-59.
- [25] 石玉, 于振文, 王东, 等. 施氮量和底追比例对小麦氮素吸收转运及产量的影响[J]. *作物学报*, 2006, 32(12): 1860-1866.
- Shi Y, Yu Z W, Wang D *et al.* Effects of nitrogen rate and ratio of base fertilizer and topdressing on uptake, translocation of nitrogen and yield in wheat [J]. *Acta Agron. Sin.*, 2006, 32(12): 1860-1866.
- [26] 何萍, 金继运, 林葆. 不同氮磷钾用量下春玉米生物产量及其组分动态与养分吸收模式研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 1998, 4(2): 123-130.
- He P, Jin J Y, Lin B. Dynamics of biomass and its components and models of nutrients absorption by spring maize under different nitrogen, phosphorous and potassium application rates [J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 1998, 4(2): 123-130.
- [27] 刘志全, 路立平, 沈海波, 等. 美国玉米高产竞赛简介[J]. *玉米科学*, 2004, 12(4): 110-113.
- Liu Z Q, Lu L P, Shen H B *et al.* Introduction on America corn yield contest [J]. *J. Maize Sci.*, 2004, 12(4): 110-113.
- [28] 刘志全, 李万良, 路立平, 等. 2006 年美国玉米高产竞赛的启示[J]. *玉米科学*, 2007, 15(6): 144-145.
- Liu Z Q, Li W L, Lu L P *et al.* Revelation of American national maize yield contest in 2006 [J]. *J. Maize Sci.*, 2007, 15(6): 144-145.
- [29] 李万良, 刘志全, 路立平, 等. 2007 年美国玉米高产竞赛简介[J]. *玉米科学*, 2008, 16(6): 169-170.
- Li W L, Liu Z Q, Lu L P *et al.* Brief introduction of America national corn yield contest in 2007 [J]. *J. Maize Sci.*, 2008, 16(6): 169-170.
- [30] 刘景辉, 王志敏, 李立军, 张海明. 超高产是中国未来粮食安全的基本技术途径[J]. *农业现代化研究*, 2003, 24(3): 161-165.
- Liu J H, Wang Z M, Li L J, Zhang H M. Higher-yield is key technical method of maintaining future food security in China [J]. *Rea. Agric. Modern*, 2003, 24(3): 161-165.
- [31] 于振文, 赵明, 王伯伦, 等. 作物栽培学各论(北方本)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003. 117.
- Yu Z W, Zhao M, Wang B L *et al.* Crop cultivation science [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2003. 117.
- [32] Arora Y, Juo A S R. Leaching of fertilizer ions in a Kaolinitic Ultisol in the high rainfall tropics: Leaching of nitrate in field plots under cropping and bare fallow [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1982, 46: 1212-1218.
- [33] Randall G W, Iragavarapu T K, Bock B R. Nitrogen application methods and timing for corn after soybean in a ridge tillage system [J]. *J. Prod. Agric.*, 1997, 10: 300-307.
- [34] Sripada R P, Heiniger R W, White J G, Weisz R. Aerial color infrared photography for determining late-season nitrogen requirements in corn [J]. *Agron. J.*, 2005, 97: 1443-1451.
- [35] 王永军. 超高产夏玉米群体质量与个体生理功能研究[D]. 泰安: 山东农业大学博士学位论文, 2008.
- Wang Y J. Study on population quality and individual physiology function of super high-yielding maize [D]. Taian: PhD. dissertation, Shandong Agricultural University, 2008.
- [36] Subedi K D, Ma B L. Nitrogen uptake and partitioning in stay-green and leafy maize hybrids [J]. *Crop Sci.*, 2005, 45: 740-747.
- [37] Osaki M, Shinano T, Tadano T. Redistribution of carbon and nitrogen compounds from the shoot to the harvesting organs during maturation in field crops [J]. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 1991, 37(1): 117-128.
- [38] Osaki M, Morikawa K, Shinano T, Tadano T. Productivity of high-yielding crops II. Comparison of N, P, K, Ca and Mg accumulation and distribution among high-yielding crops [J]. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 1991, 37(3): 445-454.