

# 施氮量对超高产夏玉米产量及氮素吸收利用的影响

吕鹏<sup>1</sup>, 张吉旺<sup>1\*</sup>, 刘伟<sup>1</sup>, 杨今胜<sup>2</sup>, 苏凯<sup>1</sup>, 刘鹏<sup>1</sup>, 董树亭<sup>1</sup>, 李登海<sup>2</sup>

(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) 为试验材料,研究了超高产条件下施氮量对夏玉米产量、氮素利用及其转运规律的影响。结果表明,随着施氮量的增加,子粒产量、植株氮素总积累量和氮肥利用率呈先增加后降低的趋势。施氮量为 N 240 ~ 360 kg/hm<sup>2</sup> 时,DH661 和 ZD958 产量分别达 12172 ~ 15080 和 12011 ~ 15360 kg/hm<sup>2</sup>; 而氮素利用率和氮肥农学利用率,DH661 分别为 10.6% ~ 23.1% 和 11.5% ~ 13.6%,ZD958 分别为 24.1% ~ 28.6% 和 9.5% ~ 11.4%; 植株氮素总积累量和氮肥利用率均达到最大。施 N 240 ~ 360 kg/hm<sup>2</sup>,提高了营养器官中氮素转运量和花后氮素同化量,可以有效调控开花前氮素转运及花后直接同化,促进子粒氮素积累,提高产量。在本试验条件下,施 N 240 ~ 360 kg/hm<sup>2</sup> 可提高氮肥利用率,实现玉米高产。

**关键词:** 夏玉米; 施氮量; 产量; 氮素利用

中图分类号: S513.062

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2011)04-0852-09

## Effects of nitrogen application on yield and nitrogen use efficiency of summer maize under super-high yield conditions

LÜ Peng<sup>1</sup>, ZHANG Ji-wang<sup>1\*</sup>, LIU Wei<sup>1</sup>, YANG Jin-sheng<sup>2</sup>, SU Kai<sup>1</sup>, LIU Peng<sup>1</sup>, DONG Shu-ting<sup>1</sup>, LI Deng-hai<sup>2</sup>

(1 State Key Laboratory of Crop Biology/College of Agronomy, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018, China;

2 Shandong Denghai Seeds Co., Ltd, Laizhou, Shandong 261448, China)

**Abstract:** The effects of nitrogen application rates on grain yield, nitrogen translocation and use efficiency under super-high yield conditions were studied in fields. Two cultivars of summer maize (*Zea mays* L.), Denghai 661 (DH661) and Zhengdan 958 (ZD958) were selected as experimental materials. The results show that the grain yield, amount of total nitrogen accumulation in plant and nitrogen recovery efficiency are increased at first, and then decreased with the increase of nitrogen application rates. The grain yields of DH661 and ZD958 reach to 12172-15080 kg/ha and 12011-15360 kg/ha under nitrogen fertilizer application rate of N 240-360 kg/ha. Under those nitrogen fertilizer application rates, nitrogen recovery efficiency and nitrogen agronomic efficiency of DH661 are 10.6%-23.1% and 11.5%-13.6%, and are 24.1%-28.6% and 9.5%-11.4% for ZD958. For the two summer maize cultivars, total nitrogen accumulation and nitrogen recovery efficiency are the highest under nitrogen fertilizer application rates of N 240-360 kg/ha. Under those nitrogen fertilizer application rates, translocation efficiency and nitrogen contribution proportion of DH661 and ZD958 after the anthesis stage could be regulated effectively. As a result, nitrogen in grain and grain yield are improved. In conclusion, under this field experiment conditions, as far as grain yield and nitrogen use efficiency are concerned, the most optimal nitrogen fertilizer rates are N 240-360 kg/ha.

**Key words:** summer maize; nitrogen application rate; yield; nitrogen utilization

收稿日期: 2010-11-04

接受日期: 2011-02-22

**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); 国家“十二五”科技支撑计划项目(2011BAD16B09)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

2008年,我国玉米单产达到 5556 kg/hm<sup>2</sup>,比 1949 年增加了近 5 倍,其中 60%~65% 归于肥料、农田管理和栽培技术的提高<sup>[1]</sup>。但是,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<sup>[2]</sup>。2004 年我国玉米农田氮素利用率仅为 26.1%<sup>[3]</sup>。

施氮对玉米产量、氮素积累、运转及氮肥利用率的影响已有大量研究<sup>[4-5]</sup>。在一定范围内,玉米产量随着施氮量的增加而提高;但过量增施氮肥导致产量有所下降<sup>[6-7]</sup>。据报道,陕西关中夏玉米产量在 7000~7700 kg/hm<sup>2</sup> 水平下,施氮量应控制在 N 125 kg/hm<sup>2</sup> 以内<sup>[8]</sup>;在北方冬小麦/夏玉米种植体系中,供氮水平在 N 120 kg/hm<sup>2</sup> 下,夏玉米产量可以保持在 6000~7500 kg/hm<sup>2</sup><sup>[9]</sup>。河南浚县在施 N 300 kg/hm<sup>2</sup> 下,产量可达 13000 kg/hm<sup>2</sup><sup>[10]</sup>。在 7500 kg/hm<sup>2</sup> 产量水平下,夏玉米生物量累积曲线与氮素累积曲线基本一致,都呈“S”型<sup>[11]</sup>;而在 12000 kg/hm<sup>2</sup> 产量水平下,夏玉米生育期养分累积趋势基本呈“直线”型<sup>[10]</sup>;两者氮素积累规律存在差异。王永军<sup>[12]</sup>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;而传统栽培模式下,为 76:24。当今高产品种吐丝后植株吸收的氮占总量的 60% 以上,生育后期缺氮显著降低产量和氮素积累量<sup>[13-14]</sup>。随氮肥用量的增加,玉米营养器官氮素运转量及对子粒氮的贡献率也增加,过量供氮则导致转运至子粒的氮素减少<sup>[15]</sup>。但也有研究认为,随着施氮量的增加,氮素的转运量、转运效率及在子粒中的比例都降低<sup>[8]</sup>。前人关于施氮量对玉米营养器官氮素向子粒中转运的影响报道虽不一致,但普遍认为过量施氮降低了子粒氮素积累,不利于玉米

干物质积累和产量提高<sup>[16]</sup>。

黄淮海区域是我国重要的玉米生产区。2007 年以来,山东省夏玉米产量超过 15000 kg/hm<sup>2</sup> 的地块越来越多,但普遍存在氮肥施用过量的现象<sup>[17]</sup>。据报道,该生态区夏玉米氮肥利用率仅 10% 左右<sup>[18-19]</sup>。用高氮肥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<sup>[20]</sup>。目前,对于超高产夏玉米生产技术研究较少<sup>[21-23]</sup>,尤其对于该生态区域内超高产条件下,玉米最适需氮量及氮素吸收分配规律鲜见报道。随着超高产玉米新品种的育成和玉米高产创建的实施,亟需相应的超高产高效生产技术。本试验通过设置大跨度的供氮水平,在不同区域超高产地块上研究了施氮量对玉米产量及氮素吸收利用效率的影响,以期明确超高产玉米的最适需氮量,并为玉米超高产高效生产提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

试验于 2008 年在山东农业大学试验农场、泰安市岱岳区汶口镇、济宁市兖州农科所同时进行。前茬作物均为冬小麦。2007、2008 年,泰安市汶口镇小侯村、济宁兖州市大安镇二十里铺村玉米达 15000 kg/hm<sup>2</sup> 以上的高产;山东农业大学试验农场多年产量水平在 13500 kg/hm<sup>2</sup> 以上。这 3 个试验地点自然条件及管理措施均可达到超高产水平<sup>[23]</sup>,是鲁中和鲁西南有代表性的高产地块。3 试验地块 0—20 cm 耕层基础地力及生育期内气候条件见表 1。供试玉米品种为郑单 958 (ZD958),是我国目前第一主推品种;登海 661 (DH661) 为达到 21042.9 kg/hm<sup>2</sup> 夏玉米高产记录的玉米品种。

表 1 试验地耕层基础地力及生长期气候条件

Table 1 Agrochemical characters of the soil tillage layer and climatic conditions during the growth and development of maize

试验点 Sites	土壤 Soil	全氮 Total N (g/kg)	碱解氮 Alk-hydr. N (mg/kg)	速效磷 Avail. P (mg/kg)	速效钾 Avail. K (mg/kg)	有机质 OM (g/kg)	降水量 Rainfall (mm)	平均气温 Avg. temp. (°C)	日照时数 Sunshine (h)
山东农业大学 SDAU	棕壤 Brown soil	0.87	86.9	52.65	129.42	8.81	477.1	22.4	770.5
泰安汶口镇 WK	潮土 Fluvo-aquic soil	1.01	65.1	70.36	96.15	16.71	476.8	22.6	782.4
兖州大安镇 YZ	潮土 Fluvo-aquic soil	0.88	58.7	60.43	113.23	15.6	505.0	24.9	684.1

注 (Note): SDAU—Shandong Agricultural University; WK—Taian Wenkou town; YZ—Yunzhou Daan town.

试验设施氮量为: N 0、120、240、360、480、600、720 kg/hm<sup>2</sup> 7 个供氮水平,分别用 N0、N120、N240、N360、N480、N600、N720 表示。所用氮肥为尿素(N

46.6%), 分别于拔节期、大喇叭口期、开花后 10 d 按照 3:5:2 施入。种植密度 ZD958 为 7.5 × 10<sup>4</sup> 株/hm<sup>2</sup>, DH661 为 9 × 10<sup>4</sup> 株/hm<sup>2</sup>, 等行距种植, 行

距为 60 cm, 小区面积 100 m<sup>2</sup>, 3 次重复, 随机排列。各处理均施磷肥 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 120 kg/hm<sup>2</sup> (过磷酸钙)、钾肥 K<sub>2</sub>O 240 kg/hm<sup>2</sup> (硫酸钾), 分别于播种时、拔节期各施 50%。6 月 15 日播种, 10 月 8 日收获, 足墒播种, 全生育期无灌溉。按高产攻关田方式进行田间管理。

### 1.2 测定项目及方法

播种前每小区取 0—20 cm 土层, 测定基础地力。农大试验场和泰安汶口试验点分别于拔节期 (取地上部整株), 开花期 (植株分为叶片、茎鞘) 和花后 (植株分为叶片、茎鞘、子粒) 每隔 10 d 取 5 株长势均匀一致的植株, 105℃ 杀青, 75℃ 烘干至恒重, 称重后磨粉、分析测定。成熟期 3 个试验点每小区收获玉米 3 行, 共 30 个果穗, 考种, 测产 (按 14% 折算含水率)。

植株及子粒全氮含量采用半微量凯氏定氮法测定<sup>[24]</sup>。

### 1.3 相关参数计算

植株总氮素积累量 (TNAA, kg/hm<sup>2</sup>) = 成熟期单株干重 × 小区植株密度 × 成熟期单株含氮量 (%)<sup>[25]</sup>;

氮素收获指数 (NHI, %) = 子粒吸氮量 / 植株吸氮量 × 100<sup>[25]</sup>;

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<sup>[25]</sup>;

氮肥利用率 (NRE, %) = (施氮区氮素吸收量 - 无氮区氮素吸收量) / 施氮量 × 100<sup>[25]</sup>;

氮肥偏生产力 (NFP, kg/kg) = 施氮区产量 / 施氮量<sup>[25]</sup>;

营养器官氮素转运量 (NTA, kg/hm<sup>2</sup>) = 开花期营养器官氮素积累量 - 成熟期营养器官氮素积累量<sup>[25]</sup>;

开花后氮素同化量 (AANAA, kg/hm<sup>2</sup>) = 成熟期子粒氮素积累量 - 营养器官氮素转运量<sup>[26]</sup>;

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<sup>[26]</sup>;

氮素转运对子粒的贡献率 (NCP, %) = 营养器官氮素转运量 / 成熟期子粒氮素积累量 × 100<sup>[26]</sup>。

试验数据采用 DPS7.05 和 Microsoft Excel 2003 进行统计分析和作图。产量与施氮量间函数方程采用 CurveExpert1.3 拟合。

## 2 结果与分析

### 2.1 施氮量对夏玉米产量的影响

施氮可以显著提高子粒产量, 随施氮量的增加子粒产量呈先升高再降低的趋势, 3 个试验点变化趋势一致。表 2 看出, DH661 和 ZD958 在施 N 240、360、480 处理下, 3 个试验点产量达到 12000 kg/hm<sup>2</sup>, 但各试验点产量达到最大时施氮量不同, DH661 在山东农业大学和泰安汶口镇试验点 N360 处理较 N0 处理分别增产 24.1% 和 39.6%, 兖州大山镇试验点 N240 处理较 N0 处理增产 39.9%; ZD958 在山东农业大学和泰安汶口镇试验点 N360 较 N0 处理分别增产 14.7% 和 32.5%。过量施氮产量并未随之增加, 反而有所下降, 其中 DH661 在兖州大山镇试验点 N720 处理较产量最高的 N240 处理下降了 25.2%。

表 2 施氮量对夏玉米子粒产量的影响 (kg/hm<sup>2</sup>)

Table 2 Effects of nitrogen rates on grain yield of summer maize

品种 Cultivar	试验点 Sites	处理 Treatments						
		N0	N120	N240	N360	N480	N600	N720
DH661	山东农业大学 SDAU	11234 d	11479 c	12173 c	13944 a	13877 ab	13578 b	13177 b
	泰安汶口镇 WK	10406 f	12415 e	13682 c	14531 b	15200 a	14744 b	12886 d
	兖州大山镇 YZ	10774 e	13440 b	15080 a	14675 a	13574 b	13097 c	11286 d
ZD958	山东农业大学 SDAU	11295 d	11655 c	12011 b	12953 a	12964 a	11625 c	11638 c
	泰安汶口镇 WK	10518 f	11786 e	13266 b	13935 a	12854 c	13741 a	12235 d
	兖州大山镇 YZ	14400 d	14922 c	15360 b	14717 c	15936 a	14668 c	15274 d

注 (Note): SDAU—Shandong Agricultural University; WK—Taian Wenkou town; YZ—Yunzhou Daan town. 同行不同字母表示差异达 5% 显著水平 Different letters within a row mean significant at the 5% level.

### 2.2 施氮量对氮素利用率的影响

施氮可以显著增加植株氮素积累, 对于氮素收获指数影响不显著。表 3 表明, 山东农业大学

试验点, DH661 和 ZD958 在施氮量为 N 480 kg/hm<sup>2</sup> 时氮素总积累量达到最大, 较 N0 处理提高了 42.01% 和 24.04%, 较 N720 处理提高了

16.31%和15.84%。泰安汶口镇试验点 DH661 在施氮量为 N 480 kg/hm<sup>2</sup> 时达到最大,较 N0 处理和 N720 处理分别提高了 48.06% 和 10.36%;继续增施氮肥后,植株含氮量增长缓慢并出现下降。氮肥偏生产力随施氮量的增加显著降低,N120 处理显著高于其他处理,氮素农学利用率和氮素利用率随施氮量增加先增高后降低,N360 处理下氮素农学利用率和氮素利用率都显著高于其他处

理。山东农业大学试验点,DH661 在 N360 处理下氮素农学利用率较 N120、N240、N480、N600、N720 分别提高了 269.3%、91.89%、36.83%、92.46%、179.03%;在 N360 处理下,氮素利用率较 N120、N240、N480、N600、N720 分别提高了 17.43%、12.51%、3.82%、11.26%、16.35%。ZD958 与泰安汶口镇试验点的变化趋势相同。说明适量施氮才能促进植株对氮素的吸收利用。

表 3 施氮量对夏玉米氮素利用率的影响

Table 3 Effects of nitrogen rates on nitrogen utilization efficiencies of summer maize

项目 Items	品种 Cultivars	试验点 Sites	处理 Treatments						
			N0	N120	N240	N360	N480	N600	N720
氮素 总积累量 (kg/hm <sup>2</sup> )	DH661	山东农业大学 SDAU	220.4 d	227.3 d	245.9 c	303.7 ab	313.0 a	291.5 b	269.1 c
		泰安汶口镇 WK	245.9 e	260.8 d	259.9 d	305.4 c	364.1 a	326.1 b	329.9 b
	ZD958	山东农业大学 SDAU	185.1 d	193.5 cd	206.4 bc	219.5 a	229.6 a	197.2 c	198.2 c
		泰安汶口镇 WK	122.1 f	155.0 e	177.6 d	225.2 a	205.3 b	188.2 c	193.4 c
氮素 收获指数 NHI	DH661	山东农业大学 SDAU	0.55 a	0.57 a	0.57 a	0.55 a	0.49 b	0.54 a	0.56 a
		泰安汶口镇 WK	0.47 b	0.46 b	0.48 ab	0.46 b	0.54 a	0.46 b	0.47 b
	ZD958	山东农业大学 SDAU	0.66 b	0.67 b	0.67 b	0.62 c	0.65 b	0.69 a	0.71 a
		泰安汶口镇 WK	0.70 abc	0.75 a	0.66 c	0.65 c	0.68 bc	0.72 ab	0.74 a
氮肥 农学利用率 (kg/kg)	DH661	山东农业大学 SDAU		2.04 e	3.92 c	7.52 a	5.49 b	3.91 c	2.69 d
		泰安汶口镇 WK		16.74 a	13.65 b	11.52 c	9.99 d	7.22 e	3.49 f
	ZD958	山东农业大学 SDAU		3.00 c	2.86 c	4.60 a	3.47 b	0.54 d	0.47 d
		泰安汶口镇 WK		10.56 b	11.45 a	9.49 c	4.87 d	5.38 d	2.39 e
氮肥 利用率 (%)	DH661	山东农业大学 SDAU		5.68 d	10.60 c	23.11 a	19.29 b	11.85 c	6.76 d
		泰安汶口镇 WK		5.83 e	12.42 c	16.53 b	24.63 a	13.37 c	11.67 d
	ZD958	山东农业大学 SDAU		7.00 c	8.87 b	9.56 a	9.27 ab	2.02 d	1.82 d
		泰安汶口镇 WK		27.42 a	24.13 b	28.64 a	17.33 c	11.01 d	9.90 d
氮肥 偏生产力 (kg/kg)	DH661	山东农业大学 SDAU		95.65 a	50.71 b	38.71 c	28.94 d	22.59 e	18.35 f
		泰安汶口镇 WK		103.41 a	57.06 b	40.35 c	31.65 d	24.59 e	17.88 f
	ZD958	山东农业大学 SDAU		97.18 a	49.88 b	36.00 c	27.06 d	19.41 e	16.12 e
		泰安汶口镇 WK		98.24 a	55.29 b	38.71 c	26.82 d	22.94 d	16.94 e

注( Note ): TNAA—Total nitrogen accumulation amount; NHI—Nitrogen harvest index; NAE—Nitrogen agronomic efficiency; NRE—Nitrogen recovery efficiency; NPPF—Nitrogen partial factor productivity. SDAU—Shandong Agricultural University; WK—Taian Wenkou town. 同行不同字母表示差异达 5% 显著水平 Different letters within a row mean significant at the 5% level.

### 2.3 施氮量对氮素转运的影响

花前氮素转运量随施氮量的增加有升高趋势,花后子粒中氮素同化量随着施氮量的增加呈现先升高后降低的趋势。表 4 看出,山东农业大学试验点,DH661 和 ZD958 施氮处理成熟期子粒氮素分别有 39.1%~52.3% 和 33.5%~66.1% 来自开花前贮存在营养器官中的氮素,有 48.7%~60.9% 和 33.9%~

66.5% 来自花后氮素同化;泰安汶口镇试验点 DH661 施氮处理成熟期子粒氮素有 41.4%~64.1% 来自开花后氮素同化。山东农业大学和泰安汶口镇试验点,N0 处理氮素转运量显著低于 N360; N720 处理花后子粒氮素同化量显著低于 N240 和 N360 处理。说明氮素亏缺和氮素过量都不利于子粒氮素积累。山东农业大学试验点 DH661 在 N240 处理下转运效

表 4 施氮量下花后氮素向子粒中的转移和对子粒的贡献  
Table 4 Nitrogen translocation and contribution to grain after anthesis under different nitrogen rates

项目 Items	品种 Cultivars	试验点 Sites	处理 Treatments						
			N0	N120	N240	N360	N480	N600	N720
氮素 转运量 (kg/hm <sup>2</sup> )	DH661	山东农业大学 SDAU	50.1 c	66.6 b	70.1 a	43.5 d	53.7 bc	48.6 c	52.2 c
		泰安汶口镇 WK	33.6 d	39.9 c	30.6 d	46.8 b	39.9 c	53.4 a	51.3 a
	ZD958	山东农业大学 SDAU	33.9 d	50.4 c	51.9 c	67.2 b	49.5 c	79.8 a	80.1 a
		泰安汶口镇 WK	30.2 d	44.7 c	34.8 d	31.2 d	31.4 d	58.5 b	63.4 a
花后氮素 同化量 (kg/hm <sup>2</sup> )	DH661	山东农业大学 SDAU	67.5 b	70.8 b	63.9 c	61.5 c	62.7 c	75.9 a	26.7 d
		泰安汶口镇 WK	24.9 e	34.8 d	54.6 c	33.0 d	69.0 a	65.0 b	66.3 b
	ZD958	山东农业大学 SDAU	45.6 e	100.5 a	93.0 b	63.3 d	72.6 c	41.1 e	60.0 d
		泰安汶口镇 WK	55.5 f	70.5 e	82.4 c	115.7 a	108.9 b	76.7 d	79.4 cd
氮素 转运效率 (%)	DH661	山东农业大学 SDAU	48.4 b	52.9 b	61.8 a	42.1 c	48.2 b	49.8 b	47.5 b
		泰安汶口镇 WK	41.7 b	37.9 c	30.6 d	40.4 bc	35.7 c	46.9 a	45.2 a
	ZD958	山东农业大学 SDAU	44.2 d	54.9 c	55.1 c	61.8 b	55.1 c	66.1 a	65.4 ab
		泰安汶口镇 WK	45.3 b	52.5 a	36.4 c	28.4 e	32.6 d	52.6 a	55.3 a
氮素转运对 子粒贡献率 (%)	DH661	山东农业大学 SDAU	42.6 cd	48.4 b	52.3 a	41.4 d	46.1 bc	39.1 d	45.2 c
		泰安汶口镇 WK	57.3 a	53.4 b	35.9 d	58.6 a	36.6 d	45.1 c	43.6 c
	ZD958	山东农业大学 SDAU	42.6 d	33.5 e	35.9 e	51.5 c	40.6 d	66.1 a	57.1 b
		泰安汶口镇 WK	35.2 b	38.8 b	29.7 c	21.3 d	22.4 d	43.2 a	44.4 a

注 (Note): NTA—Nitrogen translocation amount; AANAA—Assimilating amount of nitrogen after anthesis; NTE—Nitrogen translocation efficiency; NCP—Nitrogen contribution proportion. SDAU—Shandong Agricultural University; WK—Taian Wenkou town. 同行不同字母表示差异达 5% 显著水平 Different letters within a row mean significant at 5% level.

率最大,氮素转运贡献率 52.3%; ZD958 在 N360 处理下转运效率最大,氮素转运贡献率为 51.5%。可见,施 N 240 ~ 360 kg/hm<sup>2</sup>,有利于提高植株氮素转运机能。

### 3 讨论

#### 3.1 施氮量对夏玉米产量及氮效率的影响

2002 年美国 Iowa 州 Francis Childs 创造的单季玉米产量纪录为 27754.5 kg/hm<sup>2</sup><sup>[28]</sup>,我国夏玉米高产纪录为 2005 李登海创造的 21042.9 kg/hm<sup>2</sup><sup>[29]</sup>。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/hm<sup>2</sup>,平均施氮量为 284.5、300 kg/hm<sup>2</sup><sup>[30-31]</sup>。我国目前超高产攻关中仍很难达到 17000 kg/hm<sup>2</sup> 的产量水平。20 世纪 80 年代 Cerrato<sup>[27]</sup>认为,施 N 225 kg/hm<sup>2</sup> 条件下,美国玉米带产量可达 10000 kg/hm<sup>2</sup>。2007 年美国全国玉米产量是 9484.2 kg/hm<sup>2</sup><sup>[31]</sup>,而 2008 我国年玉米单产仅为 5556 kg/hm<sup>2</sup><sup>[11]</sup>。可见,我国一般生产田及高产攻

关田产量水平较美国仍有很大差距。

高产田对我国粮食总产的贡献率为 54.1%,提高单产是保障我国粮食安全的基本技术途径<sup>[32]</sup>。试验地点泰安市汶口镇小候村、济宁兖州市大安镇二十里铺村分别在 2007 和 2008 年创出 15000 kg/hm<sup>2</sup> 以上的高产。从 2006 和 2007 美国玉米高产竞赛中可以看出,高产田较一般生产田需要更高的投入,但在高产攻关中不计成本施用氮肥既不利于植株对氮素的吸收利用,又阻碍了超高产栽培技术的推广。前人关于施氮量对夏玉米产量影响的研究多集中于一般生产田水平,报道的适宜施氮量多为 N 125 kg/hm<sup>2</sup>,其产量水平不超过 7500 kg/hm<sup>2</sup><sup>[8-9]</sup>。一般生产田适宜的施氮量无法在高产地块实现产量 12000 kg/hm<sup>2</sup> 以上的超高产。本研究以高产为前提,施 N 240 ~ 480 kg/hm<sup>2</sup> 范围内, DH661 和 ZD958 在 3 个试验点产量均达到 12000 kg/hm<sup>2</sup> 以上。

Osaki 等<sup>[33]</sup>指出,过量施氮导致叶片早衰及光合能力下降,最终可能影响到正在发育子粒的碳、氮

代谢,不利于产量形成和氮肥利用率的提高。本研究表明,施氮显著提高玉米产量,超过一定范围增加施氮量产量有所下降,两品种在施 N 720 kg/hm<sup>2</sup> 下的产量均较各试点最高产量显著降低。说明过量施氮不利于玉米增产,与国外研究报道一致,但其机理有待于进一步深入研究。

氮肥农学利用率、氮肥吸收利用率和氮肥偏生产力是用来表示氮肥利用率的常用定量指标,可从不同的侧面描述作物对氮素或氮肥的利用效率<sup>[34]</sup>。据报道,施氮对氮效率的影响因品种而异<sup>[4]</sup>;氮肥吸收利用率、氮肥农学利用率、氮肥偏生产力随施氮量增加而降低<sup>[15,35]</sup>。本研究结果表明,DH661 和 ZD958 氮素偏生产力随施氮量增加而显著降低;在山东农业大学试验点两品种在 360 kg/hm<sup>2</sup> 施氮量下较其他处理显著提高了氮素农学利用率和氮素吸收利用率;而泰安汶口镇试验点 DH661 氮素农学利用率随施氮量增加而显著降低,氮肥吸收利用率在施 N 480 kg/hm<sup>2</sup> 下达到最大。ZD958 在施 N 240 和 360 kg/hm<sup>2</sup> 下,氮素农学利用率和氮肥吸收利用率显著高于其他处理;低于 N 240 kg/hm<sup>2</sup> 虽然可以提高氮肥偏生产力,但产量显著降低;高于 N 360 kg/hm<sup>2</sup> 个别试验点和品种仍有增产效果,但氮肥农学利用率、氮肥吸收利用率显著降低,导致氮素利用率低。随施氮量增加两品种的产量和氮素吸收利用率变化趋势一致,DH661 属中晚熟品种,耐密植,花后叶片保绿性好,灌浆期较 ZD958 延长,因此总氮素积累量高于 ZD958。

前人通常用线性加平台模式、二次型加平台模式、二次多项式模式、指数曲线模式、平方根模式拟合玉米产量和施肥量的关系<sup>[27]</sup>。根据本试验结果,选择拟合度最高的二次多项式模式模拟产量与施氮量间的关系(图 1),即:  $Y_1 = a + bX + cX_1^2$ ,式中:  $Y_1$  (t/hm<sup>2</sup>) 为各处理在 3 个试验点的平均产量,  $X_1$  (kg/hm<sup>2</sup>) 为施氮量<sup>[27]</sup>。各处理产量最大时施氮

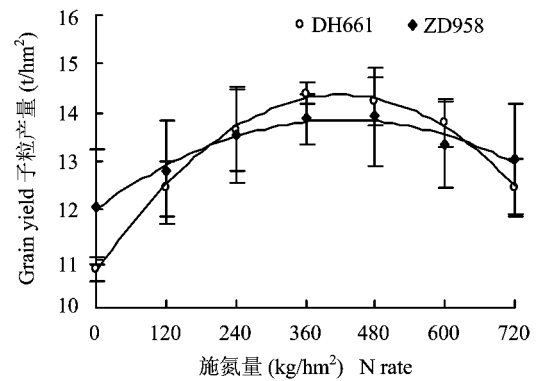


图 1 产量与施氮量间模型拟合  
Fig. 1 The model describing relationships between N rates and grain yield

量为  $X_{\max} = -b/2c$ 。计算可知,DH661 和 ZD958 最大产量施氮量分别为 419.66 kg/hm<sup>2</sup> 和 271.39 kg/hm<sup>2</sup>。综合考虑氮肥施用成本以及产量利润后可得,DH661 和 ZD958 产量利润达到最大时施氮分别为 343.70 kg/hm<sup>2</sup> 和 271.39 kg/hm<sup>2</sup>(表 5)。该施氮量可保证高产同时兼顾经济效益,在生产实际中具有应用推广价值。本试验以高产为前提,综合考虑山东农业大学和泰安汶口镇试验地点氮肥农学利用率、氮肥吸收利用率,可以看出,240 ~ 360 kg/hm<sup>2</sup> 施氮范围内两品种在各试验点保持了较高的产量水平,同时较过量施氮处理显著提高了对氮素的吸收利用。

### 3.2 施氮量对夏玉米氮素吸收转运的影响

开花至成熟期是玉米氮素吸收运转分配的重要时期。有研究表明<sup>[36-37]</sup>,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,另一部分则来源于根系直接供应。何萍等<sup>[38]</sup>指出,过量供氮使营养体氮素代谢过旺,导致运往子粒的氮素减少。因此超高产模式下,适宜的施氮量应充分考虑调节植株开花后氮素的吸收和转运。本研究表明,低氮处理下花前氮素转移显著低于其他处理,高氮处理下花

表 5 产量与施氮量间模型特征参数

Table 5 Characteristic parameters of the model between nitrogen rates and grain yield

品种 Cultivar	特征参数 Characteristic parameter					
	$r$	$a$	$b$	$c$	$X_{\max}$ (kg/hm <sup>2</sup> )	$X_2$ (kg/hm <sup>2</sup> )
DH661	0.9978	10.745	0.017240	$-2.0540 \times 10^{-5}$	419.66	343.70
ZD958	0.9849	12.021	0.008615	$-1.0138 \times 10^{-5}$	424.88	271.39

注 (Note): 当年市场价玉米为 1600 Yuan/t, 尿素为 2 Yuan/kg, 产量利润为  $Y_2 = 1600 \times Y_1 - 4.35X_1 - M$ ,  $M$  为除氮肥外其他生产成本,  $X_2$  为最大利润时施氮量 The price of maize and urea is 1600 Yuan/t and 2 Yuan/kg, respectively; Yield benefit  $Y_2 = 1600 \times Y_1 - 4.35X_1 - M$ ,  $M$  was other costs;  $X_2$  was N rate for maximum benefit.

后子粒同化量显著低于施 N 240 ~ 360 kg/hm<sup>2</sup> 处理; 同时适宜施氮可以提高玉米植株花后的氮素转运效率, 即施 N 240 ~ 360 kg/hm<sup>2</sup> 的氮素转运率高于其他处理。如山东农业大学试验点, DH661 在施 N 240 和 360 kg/hm<sup>2</sup> 下, 子粒氮素来自花后同化的部分分别为 47.7%、58.6%, 其他点两品种的反应趋势一致。这说明该施氮范围可有效调节开花前氮素转运以及开花后子粒的氮素同化, 有利于玉米植株全生育期内对氮素进行吸收分配。

### 3.3 土壤及环境状况对夏玉米产量及氮素吸收利用的影响

在黄淮海地区超高产夏玉米所需的积温和日照时数均可得到满足<sup>[23]</sup>。本试验中各试验点降水丰富, 日照时数差别不大, 因此光照和水分对于本试验结果影响很小。根据农业部《NYT 309-1996 全国耕地类型区、耕地地力等级划分》标准可以看出, 山东农业大学试验点有机质含量偏低, 其他试验点地力水平平均达到黄淮海地区较高水平。山东农业大学试验点两品种不施氮条件下产量高于其他试验点, 这与该点土壤碱解氮和速效钾含量较高有关。适量施氮后两品种在兖州大山镇和泰安汶口镇试验点的产量均高于山东农业大学试验点。DH661 在 360 kg/hm<sup>2</sup> 的施氮量下, 兖州大山镇、泰安汶口镇试验点较山东农业大学产量提高了 5.24%、4.21%; ZD958 在施 N 240 kg/hm<sup>2</sup> 下, 兖州大山镇、泰安汶口镇点较山东农业大学点产量提高了 28.2%、10.7%。泰安汶口镇和兖州大山镇点最高产量均突破 15000 kg/hm<sup>2</sup>。同时, 泰安汶口镇试验点各处理的氮素积累总量和氮素吸收利用率高于山东农业大学试验点。由此看出, 在高有机质含量地块应更加重视施氮的增产作用。

美国玉米主产区土壤有机质含量在 3% 以上, 因此在相同施氮水平下较我国玉米高产攻关获得更高的产量<sup>[25]</sup>。有机质含量的差异导致了不同试验地点之间的产量差异, 提高土壤有机质含量可以促进玉米增产及植株对氮素的吸收利用, 其作用机理有待进一步研究。

综合考虑产量、经济效益、氮素利用率及转运规律, 可以认为, 在本试验条件下, 施 N 240 ~ 360 kg/hm<sup>2</sup>, 在拔节期、大穗期、开花后 10 d 按照 3:5:2 施入是科学合理的。对于施氮时期以及各时期适宜施氮量仍需进一步深入研究。

### 参考文献:

[1] 戴景瑞, 鄂立柱. 我国玉米育种科技创新问题的几点思考[J].

玉米科学, 2010, 18(1): 1-5.

Dai J R, E L Z. Scientific and technological innovation of maize breeding in China [J]. *J. Maize Sci.*, 2010, 18(1): 1-5.

[2] 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): 913-933.

Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F *et al.* Nutrient use efficiencies of major cereal crops in china and measures for improvement [J]. *Acta Pedol. Sin.*, 2008, 45(5): 913-933.

[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] 徐祥玉, 张敏敏, 翟丙年, 等. 夏玉米氮效率基因型差异研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(4): 495-499.

Xu X Y, Zhang M M, Zhai B N *et al.* Genotypic variation in nitrogen use efficiency in summer maize [J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2006, 12(4): 495-499.

[5] 郭强, 赵久然, 陈国平, 王长武. 长效肥料对提高夏玉米氮肥利用率的研究[J]. *北京农业科学*, 1998, 16(3): 35-37.

Guo Q, Zhao J R, Chen G P, Wang C W. Study on controlled-release to heighten nitrogen use efficiency in summer maize [J]. *Beijing Agric. Sci.*, 1998, 16(3): 35-37.

[6] Kniep K R, Mason S C. Kernel breakage and density of normal and opaque-2 maize grain as influenced by irrigation and nitrogen [J]. *Crop Sci.*, 1989, 29: 158-163.

[7] 金继运, 何萍, 刘海龙, 等. 氮肥用量对高淀粉玉米和普通玉米吸氮特性及产量和品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(6): 568-573.

Jin J Y, He P, Liu H L *et al.* Comparison of nitrogen absorption, yield and quality between high-starch and common corn as affected by nitrogen application [J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2004, 10(6): 568-573.

[8] 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*, 2005, 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.*, 2005, 12(5): 622-627.

[9] Liu X J, Ju X T, Zhang F S *et al.* Nitrogen dynamics and budgets in a winter wheat-maize cropping system in the North China Plain [J]. *Field Crops Res.*, 2003, 83: 111-124.

[10] 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.

[11] 宋海星, 李生秀. 玉米生长量、养分吸收量及氮肥利用率的动态变化[J]. *中国农业科学*, 2003, 36(1): 71-76.

Song H X, Li S X. Dynamics of nutrient accumulation in maize plants under different water and N supply conditions [J]. *Sci. Agric. Sin.*, 2003, 36(1): 71-76.

[12] 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.
- [13] Subedi K D, Ma B L. Nitrogen uptake and partitioning in stay-green and leafy maize hybrids [J]. *Crop Sci.*, 2005, 45: 740-747.
- [14] Rajcan I, Tollenaar M. Source: sink ratio and leaf senescence in maize II. Nitrogen metabolism during grain filling [J]. *Field Crops Res.*, 1999, 60(3): 255-265.
- [15] 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.
- [16] 吕丽华, 陶洪斌, 王璞, 等. 施氮量对夏玉米碳、氮代谢和氮利用效率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(4): 630-637.
- Lü L H, Tao H B, Wang P *et al.* The effect of nitrogen application rate on carbon and nitrogen metabolism and nitrogen use efficiency of summer maize [J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2008, 14(4): 630-637.
- [17] Cui Z L, Chen X P, Miao Y X *et al.* On-farm evaluation of the improved soil N min-based nitrogen management for summer maize in north China plain [J]. *Agron. J.*, 2008, 100(3): 517-525.
- [18] 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): 1620-625.
- [19] 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.
- [20] Guo J H, Liu X J, Zhang Y *et al.* Significant acidification in major Chinese croplands [J]. *Science*, 2010, 327(5968): 1008-1010.
- [21] 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.
- [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. 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 gain quality of cereals and oils [M]. Beijing: Agricultural Press, 1985. 31-41, 57-59.
- [25] 霍中洋, 葛鑫, 张洪程, 等. 施氮方式对不同专用小麦氮素吸收及氮肥利用率的影响[J]. *作物学报*, 2004, 30(5): 449-454.
- Huo Z Y, Ge X, Zhang H C *et al.* Effect of different nitrogen application types on N-absorption and N-utilization rate of specific use cultivars of wheat [J]. *Acta Agron. Sin.*, 2004, 30(5): 449-454.
- [26] 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.
- [27] Cerrato M E, Blackmer A M. Comparison of models for describing corn yield response to nitrogen fertilizer [J]. *Agron. J.* 1990, 82: 138-143.
- [28] 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.
- [29] 王崇桃, 李少昆, 韩伯棠. 玉米高产之路与产量潜力挖掘[J]. *科技导报*, 2006, 24(4): 8-11.
- Wang C T, Li S K, Han B T. Approaches to high-yielding and yield potential exploration in corn [J]. *Sci. Tech. Rev.*, 2006, 24(4): 8-11.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 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]. *Res. Agric. Modern*, 2003, 24(3): 161-165.
- [33] Osaki M, Iyoda M, Tadano T. Ontogenetic changes in the contents



- of ribulose - 1, 5 - bisphosphate carboxylase/oxygenase, phosphoenolpyruvate carboxylase, and chlorophyll in individual leaves of maize [J]. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 1995, 41(2): 285-293.
- [34] Novoa R, Loomis R S. Nitrogen and plant production [J]. *Plant Soil*, 1981, 58: 177-204.
- [35] 江立庚, 曹卫星, 甘秀琴, 等. 不同施氮水平对南方早稻氮素吸收利用及其产量和品质的影响[J]. *中国农业科学*, 2004, 37(4): 490-496.
- Jiang L G, Cao W X, Gan X Q *et al.* Nitrogen uptake and utilization under different nitrogen management and influence on grain yield and quality in rice [J]. *Sci. Agric. Sin.*, 2004, 37(4): 490-496.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 何萍, 金继运, 林葆. 氮肥用量对春玉米叶片衰老的影响及其机理研究[J]. *中国农业科学*, 1998, 31(3): 1-4.
- He P, Jin J Y, Lin B. Effect of N application rates on leaf senescence and its mechanism in spring maize [J]. *Sci. Agric. Sin.*, 1998, 31(3): 1-4.