植物营养与肥料学报 2012,18(6):1343-1353
Plant Nutrition and Fertilizer Science

施氮量和种植密度对高产夏玉米产量和氮素利用效率的影响

曹胜彪[1], 张吉旺[1*], 董树亭[1], 刘 鹏[1], 赵 斌[1], 杨今胜[2]
(1 作物生物学国家重点实验室/山东农业大学农学院,山东泰安 271018;
2 山东省玉米育种与栽培技术重点实验室,山东莱州 261448)

摘要: 选用 DH661 和 ZD958 为试验材料,设置 0、120、240、360 kg/hm^2 4 个施氮水平和 60000、75000、90000 株/hm^2 3 个种植密度,研究了施氮量和种植密度对高产夏玉米产量和氮素利用效率的影响。结果表明,与低密度 60000 株/hm^{2}相比,增施氮肥可显著增加 90000 株/hm^2 高密度下玉米的单株干物质积累量、群体干物质积累量、籽粒产量、总氮素积累量、氮素转运量。90000 万株/hm^2 种植密度条件下,随施氮量增加,氮素转运效率及贡献率呈上升趋势,而氮肥偏生产力、氮肥农学效率、氮肥利用率呈下降趋势。本试验条件下,适量增施氮肥可以显著提高高种植密度下玉米的籽粒产量和氮素利用效率。综合考虑产量和氮素利用效率两因素,ZD958 和 DH661 两品种获得高产适宜的种植密度为 90000 株/hm^2,施氮量为 240～360 kg/hm^2。

关键词: 高产夏玉米; 施氮量; 种植密度; 产量; 氮素利用率
中图分类号: S513.062.01　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1008-505X(2012)06-1343-11

Effects of nitrogen rate and planting density on grain yield and nitrogen utilization efficiency of high yield summer maize

CAO Sheng-biao[1], ZHANG Ji-wang[1*], DONG Shu-ting[1], LIU Peng[1], ZHAO Bin[1], YANG Jin-sheng[2]
(*1 State Key Laboratory of Crop Biology/College of Agronomy, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China; 2 Shandong Key Laboratory of Maize Breeding and Cultivation Techniques, Laizhou, Shandong 261448, China*)

Abstract: Two summer maize cultivars, DH661 and ZD958, were used as experiment materials to study the effects of different nitrogen rates (N 0 kg/ha, 120 kg/ha, 240 kg/ha and 360 kg/ha) and planting densities (60000 plant/ha, 75000 plant/ha, and 90000 plant/ha) on yield and nitrogen use efficiency of summer maize under the field condition. The results show that compared with the 60000 plant/ha, the increase of nitrogen rate could increase the dry matter accumulation amount per plant, biomass, grain yield, total nitrogen accumulation, nitrogen transition rate and nitrogen transition efficiency of maize. The contribution proportion of nitrogen is increased with the increase of the nitrogen rate, while the nitrogen partial factor productivity, nitrogen agronomy efficiency and nitrogen recovery efficiency are decreased. In conclusion, under this experimental field condition, the increase of the nitrogen rate could improve grain yield, nitrogen use efficiency in higher planting density. As far as the grain yield and nitrogen efficiency are concerned, the most optimal plant density and nitrogen rate are both 90000 plant/ha and N 240-360 kg/ha, respectively.

Key words: high-yield summer maize; nitrogen rate; planting density; grain yield; nitrogen utilization efficiency

收稿日期: 2012-03-25　　**接受日期:** 2012-08-19
基金项目: 国家自然科学基金项目(31271662); 山东省现代农业产业技术体系; 公益性行业(农业)科研专项(200903003); 山东省玉米育种与栽培技术企业重点实验室开放课题资助。
作者简介: 曹胜彪(1986—),男,河南范县人,硕士研究生,主要从事作物高产生理生态研究。E-mail: shbcao123@163.com
* 通讯作者 E-mail: jwzhang@sdau.edu.cn

我国玉米单产增长的35%～40%归功于品种的遗传改良[1]，而栽培技术的改进、田间管理模式的更新在增产中发挥了主要作用。增加种植密度、提高光温资源利用率、依靠群体发挥增产潜力是获得高产的重要措施之一[2]。2002年美国Iowa州的Francis Childs在非灌溉条件下创造了单季春玉米产量27351.0 kg/hm^{2}的纪录，其收获密度为10.89万株/hm^2[3]，2005年，李登海创造了21042.9 kg/hm^{2}的夏玉米产量记录，其种植密度为10.203万株/hm^2，实收穗数为98610穗/hm^2，其试验材料皆为紧凑耐密的品种[4]。可见选用耐密植品种，适当提高种植密度是实现我国玉米高产的重要途径之一。

氮是植物必需的营养元素，也是作物产量形成的最重要养分限制因子。施氮可显著提高农作物产量，但是由于栽培管理粗放、施肥方法不科学，大田生产中存在"一炮轰"和地表撒施等问题。另外，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，从而造成氮肥利用率低。张福锁等[5]报道，我国主要农作物水稻、小麦、玉米的氮肥利用率远低于国际平均水平，其中玉米仅为26.1%。目前，世界范围内氮肥的平均利用率约为33%[6]。要大幅度提高肥料利用率，减少对环境的污染，就必须从植物营养学、土壤学、农学等多学科联合攻关入手，同时提高作物产量和养分利用效率，协调作物高产与环境保护[5]。江立庚等[7]研究认为，适宜的栽培密度可促进水稻高效吸收土壤氮素以降低环境压力，并且提高施氮的经济效益。前人研究表明，随着种植密度增加，水稻群体总氮素积累量增加，氮素吸收利用效率提高[8-10]。曹倩等[11]研究认为，随种植密度提高，冬小麦氮肥吸收利用率、氮肥偏生产力以及氮素养分利用效率都呈先增加后降低的趋势，总氮素积累量增加。关于增加种植密度对玉米氮素利用效率的影响鲜见报道。本文旨在研究增加种植密度条件下施氮量对夏玉米产量和氮素利用效率的影响，为高产夏玉米的氮素管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设计

本试验于2011年在山东农业大学试验农场进行。选用登海661（DH661）和郑单958（ZD958）为试验材料，郑单958是我国目前第一大主推品种，登海661为2005年李登海创21 t/hm^{2}夏玉米产量记录的品种。试验地耕层土壤pH值为6.5，养分含量分别为：有机质12.26 g/kg、全氮0.74 g/kg、碱解氮97.72 mg/kg、速效磷65.67mg/kg、速效钾126 mg/kg。

试验采用裂区设计，密度水平为主区，设置3个种植密度，分别为60000株/hm^2、75000株/hm^2、90000株/hm^2。氮肥水平为副区，设置4个氮肥水平，分别为N 0 kg/hm^2、120 kg/hm^2、240 kg/hm^2、360 kg/hm^2。两个品种共24个处理，每个处理3次重复，小区面积24.9 m^2，等行距种植，行距60 cm，随机排列。施用氮肥为尿素，含氮量46%，分别在拔节期、大喇叭口期、花后10 d，按3∶5∶2的比例施入。各处理在播前和拔节期分别按1∶1比例施入磷肥（P_2O_5）120 kg/hm^{2}和钾肥（K_2O）240 kg/hm^2，磷肥为过磷酸钙，钾肥为硫酸钾。按高产田进行田间管理。

1.2 测定项目与方法

每小区分别于拔节期（V6）、大喇叭口期（V12）、开花期（VT）、花后14 d（VT+14）、花后28 d（VT+28）、花后42 d（VT+42）、成熟期（R6）取5株长势均匀一致的植株。拔节期整株烘干，大喇叭口期和开花期分为茎鞘、叶片两部分，开花期之后分为叶片、茎鞘、穗轴、籽粒4部分，105℃杀青30 min，75℃烘干至恒重，称重后磨粉保存待测。成熟期收获、测产、考种。

植株和籽粒全氮含量采用浓H_2SO_4-H_2O_2联合消煮后，用BRAN+LUEBBE公司的AA3连续流动分析仪测定。

1.3 相关指标计算[12-14]

植株总干物质积累量（Total dry matter，TDA）=成熟期单株总干重×成熟期实收株数

花后单株干物质积累量（Amount of dry matter per plant after anthesis，ADMA）=成熟期单株干物质积累量-开花期单株干物质积累量

花后单株干物质贡献率（Contribution proportion of the dry matter after anthesis，CPDMA）= 花后单株干物质积累量/成熟期单株干物质积累量

花后群体干物质积累量（Amount of dry matter of

groups after anthesis, ADMGA) = 成熟期群体干物质积累量-开花期群体干物质积累量

花后群体干物质贡献率(Contribution proportion of the dry matter of groups after anthesis, CPDMGA) = 花后群体干物质积累量/成熟期群体干物质积累量

植株总氮素积累量(Total nitrogen accumulation amount in plant, TNAA) = 成熟期单株干重 × 成熟期植株含氮量

氮素收获指数(Nitrogen harvest index, NHI) = 籽粒含氮量/植株吸氮量

氮肥农学利用率(Nitrogen agronomic efficiency, NAE) = (施氮区籽粒产量-无氮区籽粒产量)/施氮量

氮肥利用率(Nitrogen utilization efficiency, NUE) = (施氮区氮素吸收量-无氮区氮素吸收量)/施氮量 ×100%

氮肥偏生产力(Nitrogen partial factor productivity, NPFP) = 施氮区产量/施氮量

营养器官氮素转运量(Nitrogen translocation amount, NTA) = 开花期氮素积累量-成熟期营养器官氮素积累量

氮素转运效率(Nitrogen translocation efficiency, NTE) = 营养器官氮素转运量/开花期营养器官氮素积累量 ×100%

氮素转运对子粒的贡献率(Nitrogen contribution proportion, NCP) = 营养器官氮素转运量/成熟期籽粒氮素积累量 ×100%

开花后氮素同化量(Assimilating amount of nitrogen after anthesis, AANAA) = 成熟期籽粒氮素积累量-营养器官氮素转运量

1.4 数据分析

试验数据采用 DPS7.05 和 Microsoft Excel 2003 进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 施氮量和种植密度对夏玉米产量的影响

由表 1 可以看出,增加种植密度可以显著提高玉米的籽粒产量。以 ZD958 为例,75000 株/hm^2 和 90000 株/hm^2 的产量分别比 60000 株/hm^2 增加 12.82% 和 19.77%。施用氮肥可以显著提高籽粒产量,在高密度条件下影响更显著。以 ZD958 为例,在高密度(90000 株/hm^2)条件下,施氮量 120 kg/hm^2、240 kg/hm^2、360 kg/hm^2 的产量分别比不施氮肥处理增加 9.56%、12.64%、17.37%。而低密度(60000 株/hm^2)条件下,高施氮量处理的籽粒产量降低。品种、密度和施氮量处理及两两间的相互作用均达到显著差异水平。两品种的产量变化趋势一致。

提高种植密度,穗行数、行粒数、千粒重、穗粒数呈下降趋势。以 ZD958 为例,种植密度为 75000 株/hm^2 和 90000 万株/hm^2 的穗粒数分别比 60000 株/hm^2 的降低了 6.30% 和 11.44%。密度为 60000 株/hm^2,施氮量为 N 120 ~ 240 kg/hm^2 时,可显著提高穗粒数、行粒数; 施氮量再增加,产量增加不显著或略有降低。密度为 90000 株/hm^2 时,随着施氮量的增加,千粒重、行粒数呈上升趋势,穗粒数显著增加。以 ZD958 为例,与不施氮肥处理相比,高密度条件下施氮量为 N 120 kg/hm^2、240 kg/hm^2 和 360 kg/hm^2 的穗粒数分别增加 5.03%、6.93%、9.25%。品种和种植密度相互作用的产量构成因素差异显著。两品种的变化趋势一致(表 1)。

2.2 干物质积累特性

随种植密度的增加,玉米单株干物质积累量减少,群体干物质积累量增加。以 ZD958 为例,密度为 75000 株/hm^2 和 90000 株/hm^2 处理的成熟期单株干物质积累量比 60000 株/hm^2 的分别降低了 9.33% 和 16.24%; 而群体干物质积累量分别增加了 12.18% 和 19.56%。大喇叭口期(V12)之前,施用氮肥对干物质积累作用不显著,成熟期干物质积累的差异主要来自 V12 后的干物质积累。花后群体干物质积累量随着种植密度的增加而显著增加,花后单株干物质积累量随着种植密度的增加显著降低。种植密度为 60000 株/hm^2 时,施用氮肥 N 120 ~ 240 kg/hm^2 可以显著增加单株和群体干物质积累量,但进一步增加氮肥施用量,干物质积累量增加不显著。种植密度为 90000 株/hm^2 时,随着氮肥施用量增加,单株和群体干物质积累量显著增加,花后干物质贡献率呈上升趋势。施氮量由 N 240 kg/hm^2 增加到 N 360 kg/hm^2 时,群体和单株花后干物质积累量没有显著增加,花后干物质贡献率下降。两品种的变化趋势一致(表 2 和表 3)。

表1 施氮量和种植密度对夏玉米产量及其构成的影响

Table 1 Effects of nitrogen rate and planting density on grain yield and yield composition of summer maize

品种 Cultivar	密度 Planting density (plant/hm^2)	施氮量 N rate (kg/hm^2)	产量 Grain yield (kg/hm^2)	穗行数 Rows per ear (No./ear)	行粒数 Kernel No. per row (No./row)	穗粒数 Kernel No. per ear (No./ear)	千粒重 1000-grain weight (g)
ZD958	60000	0	8769 j	15.34 abc	31.45 c	474 d	279 c
		120	9444 h	15.53 ab	32.38 b	505 b	287 a
		240	10152 g	15.67 a	32.42 a	541 a	284 b
		360	10021 gh	15.68 a	32.42 a	536 a	283 b
	75000	0	9722 gh	15.12 bc	30.87 g	458 f	264 f
		120	10735 e	15.35 abc	31.12 f	478 cd	276 d
		240	11075 d	15.36 abc	31.21 e	488 c	279 c
		360	11775 ab	15.53 ab	31.41 d	502 b	283 b
	90000	0	10459 ef	15.00 c	29.40 k	432 g	255 g
		120	11459 c	15.31 abc	30.27 j	454 f	270 e
		240	11781 ab	15.34 abc	30.35 i	462 ef	272 e
		360	12276 a	15.38 abc	30.44 h	472 de	276 d
DH661	60000	0	8688 h	15.40 ab	32.76 d	508 b	258 c
		120	9081 fg	15.56 a	34.17 b	525 a	269 a
		240	9276 f	15.59 a	34.20 a	535 a	265 ab
		360	9253 f	15.59 a	34.01 c	535 a	264 b
	75000	0	9053 fg	15.32 ab	31.59 g	476 d	233 g
		120	9539 e	15.34 ab	31.92 f	489 c	247 ef
		240	9753 de	15.38 ab	32.19 e	495 c	249 e
		360	10333 c	15.39 ab	32.18 e	507 b	255 cd
	90000	0	9432 e	14.56 c	29.86 k	420 g	236 g
		120	10159 d	14.78 bc	30.37 j	438 f	244 f
		240	10623 b	14.86 bc	30.71 i	449 f	248 ef
		360	11186 a	15.14 abc	30.97 h	465 e	251 de
显著水平 Significant level (P)							
品种 Cultivar (A)			<0.0001	0.0556	<0.0001	0.3373	<0.0001
种植密度 Plant density (B)			<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
施氮量 Nitrogen rate (C)			<0.0001	0.0176	0.0002	<0.0001	<0.0001
A×B			0.0007	0.0293	0.0045	0.0108	0.006
A×C			0.047	0.9314	0.9646	0.3072	0.9971
B×C			0.0194	0.9687	0.7047	0.6183	0.0146
A×B×C			0.659	0.9531	0.9902	0.5974	0.9128

注(Note)：同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

表 2　施氮量和种植密度对夏玉米单株干物质积累特性的影响

Table 2　Effects of nitrogen rate and planting density on dry matter accumulation per plant of summer maize

品种 Cultivar	密度 Planting density (plant/hm²)	施氮量 N rate (kg/hm²)	不同生育时期干物质积累量(g/plant) Dry matter accumulation of different growth period							花后干物质积累量 ADMA (g/plant)	花后干物质贡献率 CPDMA (%)
			V6	V12	VT	VT+14	VT+28	VT+42	R6		
ZD958	60000	0	9.9 b	47.3 ef	110.4 d	163.9 f	200.4 d	252.3 cd	263.8 d	153.4 e	58.1 bc
		120	9.9 b	54.6 bc	119.4 b	174.4 c	215.9 b	267.2 b	285.6 b	166.3 c	58.2 bc
		240	9.9 b	56.3 ab	116.6 c	188.8 a	222.5 a	284.5 a	292.8 a	176.2 a	60.2 a
		360	9.9 b	58.2 a	120.1 b	189.5 a	224.2 a	285.5 a	291.7 a	171.6 b	58.8 b
	75000	0	10.7 a	45.8 f	106.8 e	165.2 ef	180.1 g	240.7 f	242.8 g	136.0 h	56.0 ef
		120	10.7 a	49.6 de	111.7 d	170.9 d	191.2 e	248.2 d	251.1 ef	139.5 g	55.6 f
		240	10.7 a	52.2 cd	122.4 a	179.0 b	209.3 c	257.8 c	259.2 d	136.8 gh	52.8 g
		360	10.7 a	54.6 bc	115.0 c	188.7 a	215.2 b	264.8 c	275.1 c	160.1 d	58.2 bc
	90000	0	8.8 c	42.1 g	92.0 h	145.5 h	161.4 i	200.6 h	219.6 i	127.6 j	58.1 bc
		120	8.8 c	47.4 ef	100.1 g	151.6 g	173.4 h	228.5 g	231.4 h	131.4 i	56.8 de
		240	8.8 c	49.5 de	102.6 f	166.5 ef	176.6 h	241.5 ef	247.0 fg	144.5 f	58.5 b
		360	8.8 c	51.9 cd	107.7 e	168.4 de	184.0 f	247.3 de	251.8 e	144.1 f	57.2 cd
DH661	60000	0	10.6 b	63.1 bc	115.9 e	174.5 de	199.5 c	244.5 c	264.3 g	148.4 ef	56.1 ef
		120	10.6 b	65.8 ab	120.5 d	181.1 c	215.4 b	277.0 b	298.0 bc	177.5 a	59.6 ab
		240	10.6 b	67.5 a	135.9 a	180.2 c	222.1 a	300.2 a	304.0 ab	168.1 b	55.3 fg
		360	10.6 b	66.3 a	128.4 c	193.8 a	224.1 a	303.2 a	306.5 a	178.0 a	58.1 c
	75000	0	9.4 c	56.6 f	110.9 g	163.2 f	174.5 f	233.2 d	256.3 h	145.4 f	56.7 de
		120	9.4 c	58.8 ef	121.4 d	172.5 e	186.9 d	245.4 c	272.4 ef	151.0 e	55.4 fg
		240	9.4 c	60.2 de	129.1 c	176.5 d	196.2 c	277.2 b	284.6 d	155.6 d	54.7 g
		360	9.4 c	62.5 cd	132.1 b	187.8 b	212.5 b	283.0 b	291.9 cd	159.8 c	54.7 g
	90000	0	11.1 a	46.0 i	93.4 j	149.2 h	166.3 g	200.8 f	219.6 j	126.2 g	57.5 cd
		120	11.1 a	48.3 h	99.9 i	157.7 g	172.3 f	223.2 e	246.4 i	146.5 f	59.5 ab
		240	11.1 a	63.1 g	104.9 h	159.7 g	179.2 e	230.8 d	265.1 fg	160.1 c	60.4 a
		360	11.1 a	56.2 f	113.4 f	163.0 f	184.4 d	244.5 c	272.6 e	159.3 c	58.4 bc

注(Note): V6—拔节期 Jointing stage; V12—大喇叭口期 Male tetrad stage; VT—开花期 Flowering stage; VT+14—花后 14d 14 days after anthesis; VT+28—花后 28d 28 days after anthesis; VT+42—花后 42 天 42 days after anthesis; R6—成熟期 Maturity stage; ADMA—Amount of dry matter per plant after anthesis; CPDMA—Contribution proportion of the dry matter after anthesis. 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

2.3　氮素利用效率

由表 4 可以看出,提高种植密度总氮素积累量、氮肥偏生产力、氮肥农学效率、氮肥利用率均随着种植密度的增加呈增加趋势,氮素收获指数随着种植密度的增加呈降低趋势。以 ZD958 为例,密度为 90000 株/hm² 和 75000 株/hm² 处理的总氮素积累量、氮肥偏生产力、氮肥农学效率、氮肥利用率分别比 60000 株/hm² 条件下增加 5.57% 和 7.47%、13.09% 和 20.05%、33.11% 和 27.09%、4.03% 和 49.13%,增施氮肥可以显著影响氮肥利用率。

表3 施氮量和种植密度对夏玉米群体干物质积累特性的影响

Table 3 Effects of nitrogen rate and plant density on dry matter accumulation of summer maize

品种 Cultivar	密度 Planting density (plant/hm²)	施氮量 N rate (kg/hm²)	不同生育时期干物质积累量(kg/hm²) Dry matter accumulation of different growth period							花后干物质积累量 ADMGA (kg/hm²)	花后干物质贡献率 CPDMGA (%)
			V6	V12	VT	VT+14	VT+28	VT+42	R6		
ZD958	60000	0	563 d	2697 j	6299 l	9348 j	11429 l	14391 k	15050 k	8750 k	58.1 bc
		120	553 d	3061 i	6694 j	9777 i	12106 k	14980 j	16016 j	9322 j	58.2b c
		240	560 d	3197 h	6615 k	10715 h	12625 i	16144 i	16617 i	10001 f	60.2 a
		360	561 d	3311 g	6832 i	10776 h	12752 h	16238 i	16590 i	9758 g	58.8 b
	75000	0	736 b	3162 h	7372 h	11399 g	12425 j	16612 g	16756 h	9384 i	56.0 ef
		120	748 b	3475 f	7827 f	11983 e	13403 f	17398 f	17605 g	9777 g	55.5 f
		240	746 b	3649 e	8554 b	12508 c	14625 c	18016 e	18112 e	9558 li	52.8 g
		360	761 a	3893 c	8202 d	13460 b	15351 a	18890 c	19624 c	11422 c	58.2 bc
	90000	0	722 c	3435 f	7508 g	11883 f	13175 g	16382 h	17928 f	10420 e	58.1 bc
		120	711 c	3809 d	8046 e	12194 d	13843 e	18371 d	18611 d	10565 d	56.8 de
		240	712 c	3984 b	8256 c	13404 b	14219 d	19439 b	19887 b	11631 b	58.5 b
		360	717 c	4207 a	8732 a	13655 a	14919 b	20049 a	20418 a	11686 a	57.2 cd
DH661	60000	0	602 d	3592 j	6594 k	9928 k	11352 l	13909 j	15036 g	8441 l	56.1 ef
		120	585 e	3637 i	6664 j	10013 j	11908 k	15318 i	16477 f	9812 j	59.6 b
		240	596 de	3803 g	7651 h	10149 i	12505 i	16905 f	17117 ef	9466 k	55.3 g
		360	596 de	3737 h	7237 i	10924 h	12630 h	17086 e	17271 def	10033 i	58.1 cd
	75000	0	657 b	3974 ef	7783 g	11455 g	12244 j	16365 h	17991 de	10208 h	56.7 e
		120	636 c	3994 e	8245 e	11714 f	12694 g	16668 g	18501 cd	10257 g	55.4 fg
		240	638 c	4097 d	8787 c	12018 e	13358 f	18874 c	19378 bc	10591 e	54.7 g
		360	643 c	4291 c	9074 b	12896 c	14597 c	19436 b	20049 b	10975 d	54.7 g
	90000	0	910 a	3752 h	7628 h	12180 d	13576 e	16390 h	17929 de	10301 f	57.5 d
		120	913 a	3958 f	8185 f	12921 c	14116 d	18289 d	20188 b	12003 c	59.5 b
		240	915 a	4356 b	8612 d	13111 b	14713 b	18942 c	21757 a	13145 a	60.4 a
		360	916 a	4620 a	9319 a	13399 a	15156 a	20099 a	22412 a	13093 b	58.4 c

注(Note): V6—拔节期 Jointing stage; V12—大喇叭口期 Male tetrad stage; VT—开花期 Flowering stage; VT+14—花后14天 14 days after anthesis; VT+28—花后28天 28 days after anthesis; VT+42—花后42天 42 days after anthesis; R6—成熟期 Maturity stage; ADMGA—Amount of dry matter of groups after anthesis; CPDMGA—Contribution proportion of the dry matter of groups after anthesis 同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatment at the 5% level.

密度为60000株/hm² 时,增施适量氮肥可以显著提高总氮素积累量,进一步增加施氮量,两品种总氮素积累量增加不显著或略有降低;氮肥偏生产力、氮素收获指数、氮肥农学利用率、氮肥利用率呈下降趋势。密度为90000株/hm² 时,随施氮量增加,总氮素积累量显著增加;氮肥偏生产力、氮肥农学利用率、氮肥利用率降低。密度为90000株/hm²、施氮量为N 120 kg/hm²时,ZD958的氮肥偏生产力、氮肥农学利用率和氮肥利用率达到最大,分别为95.5 kg/kg、8.33 kg/kg和23.70%。密度90000株/hm²、施氮量N 360 kg/hm²时,ZD958的总氮素积累量达到最大,为236 kg/hm²。两品种的变化趋势基本一

表 4　施氮量和种植密度对夏玉米氮素利用效率的影响

Table 4　Effects of nitrogen rate and planting density on nitrogen utilization efficiency of summer maize

品种 Cultivar	密度 Planting density (plant/hm^2)	施氮量 N rate (kg /hm^2)	总氮素积累量 TNAA (kg/hm^2)	氮收获指数 NHI	氮肥偏生产力 NPFP (kg/kg)	农学利用率 NAE (kg/kg)	氮肥利用率 NUE (%)
ZD958	60000	0	167 g	0.70 a			
		120	187 e	0.68 b	78.7 c	5.62 b	16.38 de
		240	206 c	0.70 a	42.3 f	5.76 b	15.96 e
		360	208 c	0.65 cd	27.8 h	3.48 d	11.20 f
	75000	0	176 f	0.67 b			
		120	196 d	0.66 c	89.5 b	8.44 a	16.99 d
		240	205 c	0.65 de	46.1 e	5.64 b	16.43 de
		360	234 a	0.64 ef	32.7 g	5.70 b	16.16 de
	90000	0	169 g	0.67 b			
		120	197 d	0.63 g	96.5 a	8.33 a	23.70 a
		240	223 b	0.63 g	49.1 d	5.51 b	22.44 b
		360	236 a	0.64 f	34.1 g	5.05 c	18.80 c
DH661	60000	0	153 i	0.66 c			
		120	190 f	0.67 bc	75.7 c	3.27 def	30.82 b
		240	201 e	0.67 b	38.7 e	2.45 f	20.15 e
		360	183 g	0.61 e	25.7 g	1.57 g	8.50 h
	75000	0	182 g	0.71 a			
		120	200 e	0.67 bc	79.5 b	4.04 cd	14.93 f
		240	219 d	0.66 c	40.6 e	2.92 ef	15.49 f
		360	231 c	0.67 bc	28.7 fg	3.55 de	13.43 g
	90000	0	172 h	0.63 d			
		120	224 d	0.68 b	84.7 a	6.06 a	43.52 a
		240	237 b	0.67 bc	44.3 d	4.96 b	27.17 c
		360	253 a	0.67 bc	31.1 f	4.87 bc	22.48 d
显著水平 Significant level (P)							
品种 Cultivar (A)			0.0815	0.1884	<0.0001	<0.0001	<0.0001
种植密度 Plant density (B)			<0.0001	0.0003	<0.0001	<0.0001	<0.0001
施氮量 Nitrogen rate (C)			<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
A × B			<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
A × C			0.0213	0.0119	<0.0001	<0.0001	<0.0001
B × C			<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
A × B × C			0.1912	<0.0001	0.001	<0.0001	<0.0001

注 (Note): TNAA—Total nitrogen accumulation amount; NHI—Nitrogen harvest index; NPFP—Nitrogen partial factor productivity; NAE—Nitrogen agronomic efficiency; NUE—Nitrogen utilization efficiency. 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatment at the 5% level.

致,总氮素积累量和氮素收获指数差异不显著,但氮肥偏生产力和氮素利用率等差异显著。品种、密度和施氮量两两间的相互作用均达到差异显著水平。

2.4 氮素转运效率

从表5可以看出,两品种种植密度为75000株/hm²和90000株/hm²处理的氮素转运量显著高于60000株/hm²处理,而75000株/hm²和90000株/hm²处理之间无显著差异。ZD958的花后氮素同化量在密度为60000株/hm²时高于75000株/hm²和90000万株/hm²,而品种DH661随着密度的增加,花后氮素同化量呈先下降后升高趋势。密度为75000株/hm²的氮素转运效率和对籽粒的贡献率贡献率均高于60000株/hm²和90000株/hm²。在低密度条件下,随着施氮量的增加,氮素转运量和花后氮素同化量先增加后降低,两品种变化趋势一致。密度为90000株/hm²时,高施氮量并没有显著

表5 施氮量和种植密度对夏玉米氮素转运的影响

Table 5 Effects of nitrogen rate and planting density on nitrogen translocation of summer maize

品种 Cultivar	密度 Planting density (plant/hm²)	施氮量 N rate (kg/hm²)	氮素转运量 NTA (kg/hm²)	花后氮素同化量 AANAA (kg/hm²)	氮素转运效率 NTE (%)	氮素转运对籽粒贡献率(%) NCP
ZD958	60000	0	50.5 f	68.0 f	51.0 a	42.6 h
		120	55.1 e	68.3 f	49.5 b	44.6 f
		240	48.7 g	89.7 a	46.0 e	35.2 i
		360	45.6 h	88.4 b	40.1 h	34.0 j
	75000	0	50.6 f	67.1 a	48.8 c	43.0 gh
		120	63.0 d	66.0 h	49.8 b	48.8 c
		240	68.9 b	62.4 i	50.8 a	52.5 a
		360	64.8 c	84.1 c	45.1 f	43.5 g
	90000	0	51.8 f	62.1 i	49.8 b	45.5 e
		120	54.1 e	70.5 e	43.9 g	43.4 g
		240	68.4 b	75.1 d	45.9 e	47.7 d
		360	75.8 a	75.2 d	48.0 d	50.2 b
DH661	60000	0	77.4 i	22.7 i	61.7 e	77.3 c
		120	75.8 j	48.2 a	57.2 g	61.1 h
		240	98.8 f	30.7 f	63.1 bc	76.3 d
		360	84.2 h	27.5 g	56.0 h	75.4 e
	75000	0	102.2 e	26.2 h	67.6 a	79.6 b
		120	106.9 d	31.0 f	62.4 d	77.5 c
		240	118.0 b	26.7 h	63.7 b	81.5 a
		360	128.6 a	23.2 e	63.3 bc	79.5 b
	90000	0	88.2 g	22.1 i	60.4 f	80.0 b
		120	103.5 e	45.9 b	61.2 e	69.3 g
		240	113.1 c	43.2 c	61.3 e	72.4 f
		360	127.3 a	39.8 d	62.7 cd	76.2 d

注(Note): NTA—Nitrogen translocation amount; AANAA—Assimilating amount of nitrogen after anthesis; NTE—Nitrogen translocation efficiency; NCP—Nitrogen contribution proportion. 同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

增加花后氮素同化量,并且品种 DH661 还出现下降趋势,但两品种的氮素转运量均随着施氮量的增加呈上升趋势,施氮量为 N360 kg/hm^2 时,氮素转运量达到最大值,ZD958 为 75.8 kg/hm^2,DH661 为 127.3 kg/hm^2,而氮素转运效率和贡献率在低密度条件下均呈下降趋势,高密度条件下则趋势相反。

3 讨论

3.1 施氮量和种植密度对夏玉米产量的影响

前人关于种植密度或者施氮量对玉米产量的影响做了大量研究[3,15-18],但是关于高种植密度生产条件下氮素管理的研究鲜见报道。陈传永等[17]认为,提高种植密度是获得玉米高产的重要途径,耐密品种的选择是栽培与育种学者研究的方向之一。增加种植密度可以显著提高籽粒产量,但单株穗粒数显著降低,千粒重有下降趋势。而本研究表明,通过增施氮肥可以增加高种植密度条件下的千粒重和穗粒数,进而提高籽粒产量。高种植密度条件下,单株穗粒数降低,但由于群体增加,单位面积群体穗粒数增加,群体效应的增加大于单株效应的降低。王永军等[18]研究认为,高种植密度条件下提高群体整齐度可较好协调个体产量潜力与群体高产的关系。因此,高密度条件下植株群体整齐度下降、空秆率增加,是限制玉米产量增加的重要因素,即降低空秆率、提高结实率将是密植高产的重要途径。

氮肥是通过对单位面积穗数、穗粒数、千粒重的综合影响,而最终影响产量。前人研究指出,氮素缺乏会显著影响穗粒数。在一定的施肥范围内,穗粒数会随着氮肥用量的增加而增加,但当氮肥施用过量时,增施氮肥对穗粒数作用不显著[19-21]。本研究表明,种植密度为 60000 株/hm^2 时,随着施氮量升高,玉米品种 DH661 和 ZD958 的穗粒数呈先增加后降低趋势;进一步增加施肥量,穗粒数降低或者增加不显著。但在高密度条件下,随施氮量增加,穗粒数呈线性上升趋势,并未出现下降。申丽霞等[22]研究认为,不施氮或施氮过多影响植株体的碳、氮代谢,影响有效粒数的形成,是造成穗粒数下降的原因之一。因此,氮肥可以通过影响穗粒数调控籽粒产量。增加种植密度条件下,氮肥是调控籽粒产量的重要因子。

玉米产量决定于干物质积累,并受经济系数制约[23],增加群体干物质积累量是提高玉米产量的基础。增加种植密度可以显著提高群体干物质积累量,但是高密度条件下,单株干物质积累量下降过大,是制约群体干物质积累量更大幅度增加的重要原因。本研究表明,大喇叭口期之后,干物质积累量的密度效应显著,增施氮肥可以显著增加花后干物质积累量。种植密度为 90000 株/hm^2 时,花后干物质积累量随施氮量的增加呈先增加后降低的趋势,过量施用氮肥并不能显著增加干物质积累量,240～360 kg/hm^2 施氮量可以认为是本试验条件下的最适施氮量。此外,是否可以通过改变其它栽培措施来提高干物质积累量还有待进一步探讨。

3.2 施氮量和种植密度对夏玉米氮素利用效率及转运效率的影响

关于施氮量、氮肥类型、施氮时期对夏玉米氮素利用效率的影响研究较多[24-30],而关于在提高种植密度条件下,增加氮肥施用量对夏玉米氮素利用效率的影响鲜见报道。本研究表明,增加种植密度可以显著提高氮肥利用率,增加群体植株吸氮量。通过定量化分析施氮量、种植密度和产量的关系,根据表 1 中施氮量、种植密度和产量数据可以模拟出两玉米品种的密度、施氮量和产量的二元二次双曲面方程:

ZD958　$Y = -1438.25 + 2444.47D + 5.3051N - 125.1667D^2 - 0.0094N^2 + 0.3636ND$ ($R^2 = 0.9823^{**}$);

DH　$Y = 8364 - 51.63333D - 3.7375N + 19.0000D^2 - 0.002813N^2 + 1.065556ND$ ($R^2 = 0.9897^{**}$)。

从品种 ZD958 模拟方程的回归系数分析,方程中密度(D)的一次项系数和二次项系数均达到显著水平,施氮量的二次项系数达到显著水平,其余各项系数不显著。DH661 模拟方程的施氮量(N)的一次项系数达到显著水平,而施氮量和密度的互作系数达到极显著水平,其余各项系数不显著。

由以上方程可以得出,玉米品种 ZD958 和 DH661 获得最高产量为 12293 kg/hm^2 和 11180 kg/hm^2 时,两品种的种植密度和施氮量分别为 90000 株/hm^2 和 359.9 kg/hm^2 以及 90000 株/hm^2 和 359.8 kg/hm^2。

本试验条件下,增加种植密度可以显著提高氮肥利用率,但是随施氮量的增加,氮肥利用率降低。360 kg/hm^2 施氮量处理的玉米籽粒产量最高,但其氮肥利用率最低。因此,综合玉米籽粒产量和氮肥利用率,两品种在种植密度为 90000 株/hm^2 和施氮量 N 240～360 kg/hm^2 时可获得较高的籽粒产量和氮肥利用率。

花后氮素的同化和开花前氮素的再分配是影响籽粒产量和氮肥利用率的重要因素。本研究表明，低密度条件下，花后氮素同化量较高，氮素转运量较低。增加种植密度，氮素转运量显著增加，转运率和对籽粒的贡献率呈上升趋势，花后氮素同化量增加不显著或呈下降趋势，可能是因为高密度条件下，氮素转运量过大，特别是茎秆氮素输出量过大，造成植株内部碳、氮代谢失调，植株早衰，降低了花后氮素同化量。因此，适宜的施氮量既保持了较高的碳、氮运转率，又避免生育后期叶片早衰，从而维持了生长中后期叶片的高光合能力，为产量与氮肥利用率达到协同提高奠定了基础[26]。

合理增加种植密度，通过增施氮肥调节植株个体和群体之间的矛盾，增加单株和群体干物质积累量，提高穗粒数，从而可获得较高的籽粒产量和氮肥利用率。本试验条件下，玉米品种 ZD958 和 DH661 获得高产的最适种植密度为 90000 株/hm^2，施氮量为 N 240～360 kg/hm^2。

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]. Maize Sci., 2010, 18(1): 1-5.

[2] 段民孝. 从农大 108 和郑单 958 中得到的玉米育种启示[J]. 玉米科学，2005，13(4)：49-52.
Duan M X. Some advice on corn breeding obtained from the elite varieties of Nongda 108 and Zhengdan 958 [J]. Maize Sci., 2005, 13(4): 49-52.

[3] 孙世贤. 2002 年美国玉米高产竞赛简况[J]. 玉米科学，2003，11(3)：102.
Sun S X. Brief situation of high yield maize competition of USA in 2002[J]. Maize Sci., 2003, 11(3): 102.

[4] 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. Technol. Rev., 2006, 24(4): 8-11.

[5] 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.
Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F *et al*. Nutrient use efficiency of major cereal crops in China and measures for improvement [J]. Acta Pedol. Sin., 2008, 45(5): 915-924.

[6] Raun W R, Jhonson V G. Improving nitrogen use efficiency for cereal production[J]. Agron. J., 1999, 91: 357-363.

[7] 江立庚，曹卫星，甘秀芹，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.

[8] 周江明，赵琳，董越勇，等. 氮肥和栽植密度对水稻产量及氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2010，16(2)：274-281.
Zhou J M, Zhao L, Dong Y Y *et al*. Nitrogen and transplanting density interactions on the rice yield and N use rate [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2010, 16(2): 274-281.

[9] 樊红柱，曾祥忠，张冀，吕世华. 移栽密度与供氮水平对水稻产量、氮素利用的影响[J]. 西南农业学报，2010，2(4)：1137-1141.
Fan H Z, Zeng X Z, Zhang J, Lü S H. Effects of transplanting density and nitrogen management on rice grain and nitrogen utilization efficiency [J]. Southwest China J. Agric. Sci., 2010, 2(4): 1137-1141.

[10] 徐春梅，周昌南，郑根深，等. 施氮量和栽培密度对超级早稻不同器官氮素积累与转运及其吸收利用率的影响[J]. 中国土壤与肥料，2011，(1)：15-20.
Xu C M, Zhou C N, Zheng G S *et al*. Effects of nitrogen accumulation and translocation in different organs and their absorption and utilization of nitrogen under different nitrogen fertilizer rates and densities of super early rice [J]. China Soils Fert., 2011, (1): 15-20.

[11] 曹倩，贺明荣，代兴龙，等. 密度、氮肥互作对小麦产量及氮素利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2011，17(4)：815-822.
Cao Q, He M R, Dai X L *et al*. Effects of interaction between density and nitrogen on grain yield and nitrogen use efficiency of winter wheat [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2011, 17(4): 815-822.

[12] 刘立军，桑大志，刘翠莲，等. 实时实地氮肥管理对水稻产量和氮素利用率的影响[J]. 中国农业科学，2003，36(12)：1456-1461.
Liu L J, Sang D Z, Liu C L *et al*. Effects of real-time and site-specific nitrogen managements on rice yield and nitrogen use efficiency [J]. Sci. Agric. Sin., 2003, 36(12): 1456-1461.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 刘伟，张吉旺，吕鹏，等. 种植密度对高产夏玉米登海 661 产量及干物质积累与分配的影响[J]. 作物学报，2011，37(7)：1301-1307.
Liu W, Zhang J W, Lü P *et al*. Effect of plant density on grain yield dry matter accumulation and partitioning in summer maize cultivar Denghai 661[J]. Acta Agron. Sin., 2011, 37(7): 1301-1307.

[16] 吕鹏，张吉旺，刘伟，等. 施氮量对超高产夏玉米产量及氮素吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2011，17(4)：852-860.
Lü P, Zhang J W, Liu W *et al*. Effects of nitrogen application on yield and nitrogen use efficiency of summer maize in super-high yield conditions[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2011, 17(4): 852-860.

[17] 陈传永，侯玉虹，孙锐，等. 密植对不同玉米品种产量性能的影响及其耐密性分析[J]. 作物学报，2010，36(7)：1153-1160.
Chen C Y, Hou Y H, Sun R *et al*. Effects of planting density on yield performance and density-tolerance analysis for maize hybrids [J]. Acta Agron. Sin., 2010, 36(7): 1153-1160.

[18] 王永军. 超高产夏玉米群体质量与个体功能研究[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.

[19] Uhart S A, Andrade F H. Nitrogen deficiency in maize: Effects on crop growth, development, dry matter partitioning, and kernel set [J]. Crop Sci., 1995, 35(5): 1376-1383.

[20] 詹其厚. 氮肥不同用量对玉米产量的影响及肥效分析[J]. 安徽农业科学，1997，25(4)：352-353，370.
Zhan Q H. Effect of nitrogen application on grain yield and analysis of application effect[J], Anhui Agric. Sin., 1997, 25(4): 352-353, 370.

[21] 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)：66-71.
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): 66-71.

[22] 申丽霞. 碳氮代谢对夏玉米穗粒数形成的影响机理[D]. 北京：中国农业大学博士学位论文. 2008.
Shen L X. Eeffct of Carbon-nitorgen metabolism on kernel number in summer maize[D]. Beijing: PhD dissertation, China Agricultural University, 2008.

[23] 陈国平. 玉米的干物质生产与分配[J]. 玉米科学，1994，2(1)：48-53.
Chen G P. Accumulation and distribution of dry matter of maize [J]. Maize Sci., 1994, 2(1): 48-53.

[24] 吕鹏，张吉旺，刘伟，等. 施氮时期对高产夏玉米氮代谢关键酶活性及抗氧化特性的影响[J]. 应用生态学报，2012，23(6)：1591-1598.
Lü P, Zhang J W, Liu W *et al*. Effects of nitrogen application period on the nitrogen metabolism key enzymes activities and antioxidant characteristics of high-yielding summer maize [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2012, 23(6): 1591-1598.

[25] 王激清，刘社平，韩宝文. 施氮量对冀西北春玉米氮肥利用率和土壤硝态氮时空分布的影响[J]. 水土保持学报，2011，25(2)：138-143.
Wang J Q, Liu S P, Han B W. Effects of nitrogen application on nitrogen use efficiency of spring maize and distribution of soil nitrate nitrogen in northwest Hebei province [J]. Soil Water Conserv., 2011, 25(2): 138-143.

[26] 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.

[27] 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.

[28] 易镇邪，王璞，陈平平，屠乃美. 氮肥类型对夏玉米氮素吸收和利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2008，14(3)：472-478.
Yi Z Y, Wang P, Chen P P, Tu N M. Effects of different types of nitrogen fertilizer on nitrogen absorption and utilization of summer maize (*Zea mays* L.) [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2008, 14(3): 472-478.

[29] 吕鹏，张吉旺，刘伟，等. 施氮时期对超高产夏玉米产量及氮素利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2011，17(5)：1099-1107.
Lü P, Zhang J W, Liu W *et al*. Effects of nitrogen application dates on yield and nitrogen use efficiency of summer maize in super-high yield conditions[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2011, 17(5): 1099-1107.

[30] 夏来坤，陶洪斌，许学彬，等. 不同施氮时期对夏玉米干物质积累及氮肥利用的影响[J]. 玉米科学，2009，17(5)：138-140，144.
Xia L K, Tao H B, Xu X B *et al*. Effects of nitrogen application time on dry matter accumulation and nitrogen use efficiency of summer maize [J]. Maize Sci., 2009, 17(5): 138-140, 144.