植物营养与肥料学报 2014,20(1):37-47
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2014.0105

施氮水平对超高产夏玉米籽粒及植株形态学特征的影响

景立权[1], 赵福成[1,2], 徐仁超[1], 袁建华[3], 陆大雷[1], 陆卫平[1*]
(1 扬州大学农学院江苏省作物遗传生理国家重点实验室培育点,江苏扬州 225009;
2 浙江省东阳玉米研究所,浙江东阳 322100; 3 江苏省农业科学院粮食作物研究所,江苏南京 210014)

摘要: 氮肥是夏玉米高产的先决条件,为明确不同施氮水平对超高产夏玉米(≥13500 kg/hm^2)籽粒及植株形态学特征的影响,以苏玉30、苏玉20、苏玉29三个玉米品种为材料,连续4年、在6个施氮水平(0、360、405、450、495、540 kg/hm^2)上,对成熟期玉米籽粒及植株的形态学特征进行了统计分析。结果表明,密植条件(82500 plant/hm^2)下,产量与施氮水平呈抛物线关系,三个品种均在450 kg/hm^{2}施氮水平下产量最高,分别为13798、14531、16787 kg/hm^2。适宜的施氮水平(450 kg/hm^2)可显著增加穗粒重、粒长、粒宽及棒三叶叶夹角角度,增大茎秆第一、二、三节间长度及茎粗,缩短果穗位三节间(第七、八、九节间)的长度。氮肥水平对籽粒厚度影响不显著。产量和茎粗与第一、二、三节间长度分别表现为极显著、显著正相关关系,与第七节间长度分别表现为显著、极显著负相关关系,而二者与其他节间长度关系不显著。因此,育种上可选育粒长和粒宽较大的品种作为玉米超高产育种的方向;生产上可在第一、二、三、七节间伸长的关键时期,通过氮肥运筹调节其节间长度,达到"扩库、强源、畅流"的目的,最终建立玉米的超高产群体。

关键词: 夏玉米;施氮水平;超高产;籽粒形态;植株形态
中图分类号: S143.1+4; S513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2014)01-0037-11

Effects of nitrogen levels on the morphology characteristics of grain and plant of summer maize (*Zea mays* L.) under super-high yield conditions

JING Li-quan[1], ZHAO Fu-cheng[1,2], XU Ren-chao[1], YUAN Jian-hua[3], LU Da-lei[1], LU Wei-ping[1*]
(*1 Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology of Jiangsu Province, College of Agriculture, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009, China; 2 Dongyang Institute of Maize Research, Dongyang, Zhejiang 322100, China; 3 Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China*)

Abstract: Nitrogen (N) is an important prerequisite for achieving high grain yield of summer maize. The objective of this study was to reveal the responses of summer maize to N levels in the morphology characteristics of plants and the yield component factors in some super-high yield (≥13500 kg/ha) maize cultivars. A field experiment with a split-plot design was conducted with three local maize hybrids (Suyu30, Suyu20 and Suyu29) and six N fertilizer application rates (0, 360, 405, 450, 495 and 540 kg/ha). The statistics results show that a parabolic relationship existed between the yields of three maize hybrids and N rates. The maximum yields turned up at the N 450 kg/ha level, which are 13798, 14531 and 16787 kg/ha, respectively. The kernel weight per ear, grain length, grain width and the length of internode near ear are increased markedly under the N 450 kg/ha, which are 239 g (take

收稿日期: 2013-03-10 **接收日期:** 2013-06-24
基金项目: 国家自然科学基金(30971731,31000684,31271640);江苏省普通高校研究生科研创新计划(CXZZ13-0906);江苏高校优势学科建设工程;江苏省三新工程[SXGC(2013)339, SXGC(2013)114];江苏高校优势学科建设工程;江苏高校优秀科技创新团队;农业科研杰出人才及其创新团队资助。
作者简介: 景立权(1985—),男,陕西汉中人,博士研究生,主要从事玉米超高产栽培生理生态研究。E-mail: 204jll@163.com
* 通信作者 E-mail: wplu@yzu.edu.cn

Suyu29 for example), 12.29 mm, 10.83 mm, 20.2°(above), 43.3°(middle) and 26.1°(below), respectively. The lengths of 1st, 2nd and 3rd internodes and stem diameter are also increased, which are 11.1, 11.4, 11.4 and 2.35 cm, respectively, while the lengths of internodes near ear (7th, 8th and 9th internodes) are decreased, which are 14.3, 14.0 and 15.5 cm, respectively. The N level does not have insignificant effect on the grain thickness. The yield and stem diameter show significant or extreme significant positive correlations with the lengths of 1st, 2nd and 3rd internodes, but significant negative with the length of 7th internode, and not insignificant with the other lengths of internodes. Therefore, big grain length and width can be used as indicators in breeding super high-yield of maize cultivars. In practical maize production, proper N application can be used effectively to regulate the lengths of 1st, 2nd, 3rd and 7th internodes, thus to build up the super high-yield population of maize through enlarged N sink and effective transfer to yield formation.

Key words: summer maize; nitrogen treatment; super-high yield; grain morphology; plant morphology

近年来玉米在我国粮食增产中的贡献率达55%[1]。玉米超高产群体的研究为玉米单产的提高注入了巨大的动力。5年内(2006～2010年)全国15000 kg/hm^{2}以上的高产田就达159块[2]。然而,我国玉米生产水平与同处北半球且自然条件、种植面积也比较相似的美国相比,差距甚远[3]。据报道,美国在2007年全国平均产量就已高达9480 kg/hm^2,而我国至今不足6000 kg/hm^2。为进一步挖掘玉米增产潜力,诸多学者对玉米高产群体开展了深入研究。从栽培措施对群体结构的调优[4-6],个体生理功能[7],氮素吸收和利用规律[5-8],根系时空分布特征[9],到茎秆的形态结构[10-12],叶宽与茎粗的关系[13],再到籽粒粒深(籽粒长度)的QTL分析[14]等,充分说明株型及籽粒形态学特征受基因及栽培环境影响,并与产量保持着密切的关系。超高产玉米群体在品种、株型、抗性、栽培技术等方面均具有独特的生理特征。但作为超高产玉米群体最直观的茎秆、叶系、籽粒形态学特征及受施氮水平的影响程度等却鲜见报道。形态学上籽粒大小包括粒长、粒宽和粒厚,研究中一般用百粒重作为籽粒大小,用其比值(长/宽、长/厚和宽/厚比)作为其形状指标[15]。然而,理清并深入研究籽粒、植株的形态学特征及对外界环境变化的响应对新时期玉米的超高产群体研究是非常必要的。本研究以高于13500 kg/hm^{2}为玉米超高产水平,以苏玉30、苏玉20、苏玉29为试材,连续4年开展不同施氮水平实验,探索其需肥规律及其施肥方案的同时,分析了施氮水平对超高产玉米茎秆及籽粒形态学特征、穗位叶叶夹角等因素的影响,以期为玉米育种及生产提供理论与技术依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试验地点

2008～2012年试验在扬州大学农学院作物栽培生理省级重点实验室试验田内进行。试验地位于东经119°26′、北纬32°24′,属亚热带季风性湿润气候。2008年筛选出在本地具有超高产潜力的品种—苏玉20,并初步确定最佳种植密度为82500 plant/hm^2。2009、2010年增加苏玉29品种,并以两品种为材料开展不同施氮水平处理试验,探索其需肥规律及其施肥方案,2012年增加苏玉30品种,继续重复试验。试验地灌排设施良好,地力均匀,耕作层20 cm土壤有机质含量28.4 g/kg、全氮1.85 g/kg、碱解氮102.3 mg/kg、速效钾38.0 mg/kg、速效磷11.34 mg/kg(由浙江省农业科学院环境资源与土壤肥料研究所测定)。

1.2 试验设计

试验在每年的6月27日前后大田直播,采用裂区试验设计,品种为主区,施氮水平为副区。2008、2009年小区面积24 m^2,2010、2012年为110 m^2,大、小行距分别为0.7和0.3 m;2008年两个密度水平(75000 plant/hm^2、82500 plant/hm^2),2010、2012年密度为82500 plant/hm^2;重复3次。根据斯坦福方程,以100 kg籽粒需氮量2.5 kg,实现产量15000 kg/hm^{2}时需施氮N 375 kg/hm^2,2008年以此为基础上下加减10%、20%,结果表明施氮量为N 450 kg/hm^2、密度为82500 plant/hm^{2}时产量最高,2009年以450 kg/hm^{2}施氮水平为基础上下加减10%、20%,2010年、2012年增加新品种继续试验。均在拔节期追施穗肥,开花吐丝期施粒肥,具体施氮

方案如表 1。P_2O_5 150 kg/hm^2、K_2O 225 kg/hm^2,均在播种时作基肥一次施用。其他管理按高产田要求进行。

表 1　氮肥施用方案(kg/hm^2)

Table 1　N applicatation amount in different growing stages

施氮处理 N treatment	基肥 Base fertilizer	穗肥 Ear fertilizer	粒肥 Grain fertilizer
		2008yr	
0	0	0	0
300.0	112.5	187.5	0.0
337.5	112.5	187.5	37.5
375.0	112.5	225.0	37.5
412.5	112.5	262.5	37.5
450.0	112.5	262.5	75.0
		2009yr, 2010yr	
0	0	0	0
360	135	225	0
405	135	225	45
450	135	270	45
495	135	315	45
540	135	315	90

1.3　测定项目及方法

1.3.1 籽粒形态指标的测定方法　每处理随机取晒干的籽粒 30 g 左右,单层平铺在根系分析系统(STD1600,EPSON 公司生产)上扫描成像后用其自带软件测量籽粒在图片上的最大长度和宽度,分别取平均值。随机取充分晒干的玉米穗 5 个,除去秃尖部分,用游标卡尺随机测量每个穗三行籽粒的完整长度,籽粒的厚度为穗行长除以行粒数,5 个棒子的籽粒厚度的均值即为籽粒厚度。长、宽、厚度的乘积即为籽粒最大体积。籽粒充实度 = 充分晒干籽粒质量(约 60 g)/排开 95% 酒精溶液的体积。

1.3.2 节间长及穗位叶叶夹角的测量　成熟期,每处理随机取 5 株,从根部起依次测量每株两节之间的长度即为节间长,并从根部第一完整节间起依次命名为一、二、三,以此类推,定义果穗位节节上一节间为穗位节间。用游标卡尺分别测量每株第一节间上、中、下部位的最粗和最细处的直径,取 5 株所有茎粗的均值即为茎粗。测量穗位三个叶片中部的切线与茎秆的夹角即为叶夹角,每处理测量 5 株取平均值。

1.3.3 籽粒产量及其构成　成熟期田间调查双穗率、空杆率,收获各小区中间两行玉米,分别装入尼龙网袋,晒干脱粒称重,以含水量 14% 的重量折算产量。另取 20 穗玉米进行考种,调查穗行数、行粒数及千粒重等。规定籽粒产量等于或高于 13500 kg/hm^2 时为超高产水平。

1.4　数据分析

采用 Microsoft Excel 2010 进行数据处理,SPSS 19.0 作统计分析,Duncan 法作多重比较。并定义最佳施氮量为最高理论产量时的施氮量;最佳施氮范围为最高理论产量的 95% 及以上时的施氮范围;超高产施氮范围为理论产量高于 13500 kg/hm^2 时的施氮范围。2010、2012 年两年试验结果趋势相似,本文主要以 2012 年数据为例进行分析。

2　结果与分析

2.1　施氮水平对三品种籽粒产量及其构成因素的影响

测产结果表明适量施氮可显著提高玉米籽粒产量(表 2)。苏玉 30、苏玉 20、苏玉 29 三品种两年的数据表明,籽粒产量随着施氮水平的提高呈先增高后降低的单峰变化趋势,在 450 kg/hm^2 施氮水平下达到最高。不同施氮水平对三品种总穗数、穗粒数、穗粒重、容重、总粒数、千粒重及产量的影响达显著或极显著水平。品种和施氮存在极显著的互作效应,施氮水平和品种及其互作对穗粒重影响最大,对容重影响最小,其变幅分别为 168.53%、8.11%。综合两年的试验数据,得施氮水平(x)与产量(y)之间的回归方程苏玉 30 为 $y = -0.2829x^2 + 260.99x - 46637$($R^2 = 0.9691^*$);苏玉 20 为 $y = -0.3166x^2 + 293.69x - 53874$ ($R^2 = 0.953^*$);苏玉 29 为 $y = -0.539x^2 + 488.14x - 94095$($R^2 = 0.9675^*$),可知本试验条件下,苏玉 30 最佳施氮量、最佳施氮范围、超高产施氮范围分别为 461.3、412.3 ~ 510.2、447.1 ~ 475.5 kg/hm^2;苏玉 20 分别为 463.8、416.4 ~ 511.2、415.6 ~ 512.0 kg/hm^2;苏玉 29 分别为 452.8、413.8 ~ 491.9、379.2 ~ 526.9 kg/hm^2。

表2 施氮水平对玉米产量及其构成因素的影响

Table 2 Effect of nitrogen treatments on grain yield and its components of maize

年份 Year	品种 Hybrid	施氮处理 N treatment	总穗数 Total ears ($\times 10^4/hm^2$)	穗粒数 Grain No. per ear (No.)	穗粒重 Kernel weight per ear (g)	容重 Test weight (g/L)	总粒数 Total grains ($\times 10^4/hm^2$)	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Yield (kg/hm^2)
2010	苏玉20 Suyu20	0	8.01 a	367 a	88 a	675 a	2938 a	241 a	6090 a
		360	8.09 b	502 b	184 b	696 b	4064 b	366 b	12790 b
		405	8.06 b	526 c	208 d	707 b	4241 c	395 c	14408 d
		450	8.07 b	565 d	223 e	716 b	4561 d	394 c	15455 e
		495	8.09 b	545 cd	198 c	712 b	4407 d	364 b	13795 c
		540	8.02 b	513 c	187 b	709 b	4113 c	364 b	12874 b
		均值 Mean	8.06	503	181	703	4054	354	12569
	苏玉29 Suyu29	0	8.07 a	373 a	87 a	688 a	3009 a	234 a	6065 a
		360	8.10 b	521 a	162 b	706 b	4222 b	310 b	11256 b
		405	8.17 b	585 b	192 c	716 b	4781 c	329 b	13511 d
		450	8.07 c	611 a	227 e	728 c	4932 d	371 c	15731 f
		495	8.16 c	610 b	201 d	726 c	4981 c	330 b	14148 e
		540	8.19 bc	564 b	182 c	712 b	4617 bc	322 b	12789 c
		均值 Mean	8.13	544	175	713	4423	316	12250
2012	苏玉30 Suyu30	0	8.01 a	403 a	89 a	695 a	3227 a	221 a	6134 a
		360	8.12 b	565 b	153 b	712 b	4585 b	270 c	10647 c
		405	8.14 b	655 c	180 d	721 bc	5334 bc	275 c	12615 d
		450	8.23 d	691 c	195 e	733 c	5689 c	282 d	13798 e
		495	8.24 d	667 c	183 d	727 bc	5496 bc	274 c	12951 d
		540	8.20 c	663 c	169 c	715 b	5437 b	255 b	11924 b
		均值 Mean	8.16	607	161	717	4962	263	11345
	苏玉20 Suyu20	0	7.26 a	373 a	96 a	678 a	2709 a	258 a	6010 a
		360	7.35 b	448 b	174 b	694 b	3292 b	388 b	10985 b
		405	7.52 c	512 c	196 c	711 b	3852 b	383 b	12689 c
		450	7.52 d	551 c	225 cd	726 c	4141 c	408 c	14531 d
		495	7.55 c	531 c	214 d	716 bc	4008 bc	403 c	13892 cd
		540	7.34 b	519 c	196 c	711 b	3809 b	377 b	12348 c
		均值 Mean	7.42	489	183	706	3635	370	11742
	苏玉29 Suyu29	0	8.10 a	359 a	93 a	686 a	2906 a	259 a	6474 a
		360	8.13 b	507 b	172 b	699 ab	4124 b	339 b	12022 b
		405	8.15 bc	551 c	208 c	718 bc	4492 c	378 c	14603 c
		450	8.16 bc	607 d	239 e	727 c	4954 d	394 d	16787 e
		495	8.17 c	596 d	222 d	722 bc	4872 d	372 c	15587 d
		540	8.17 c	500 b	174 b	716 b	4083 b	348 b	12219 b
		均值 Mean	8.15	520	185	711	4239	348	12949
	总均值 Total mean		7.91	539	177	712	4278	327	12012
	变幅 Changing range(%)		13.47	92.48	168.53	8.11	110.05	84.62	179.32
F 值 *F*-value	氮水平 N rate		140.36**	116.00**	294.05**	12.37**	145.53**	519.68**	346.06**
	品种 Hybrid		10325.84**	118.37*	57.91**	3.32*	254.63**	1915.06**	50.20**
	品种×氮水平 Hybrid×N rate		31.19**	7.76**	4.63**	169.00	9.88**	38.52**	5.24**

注(Note)：同列数据后内不同字母者表示相同品种不同氮处理间在0.05水平上差异显著 For the same cultivation, values followed by different letters in a column are significantly different among different N reatments at $P < 0.05$; *, ** 分别表示在0.05和0.01水平上差异显著 Significantly different at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

2.2 施氮水平对籽粒形态学特征的影响

施氮水平及品种对籽粒形态学结构的影响呈显著或极显著差异(表 3)。三个品种的籽粒充实度、籽粒几何形态及籽粒最大体积随着施氮水平的提高呈现上升的趋势,但过量施氮(N 540 kg/hm^2)下,并没有表现出进一步升高的趋势,或略有降低。与对照(0 kg/hm^2)相比,450 kg/hm^2 施氮水平下籽粒充实度、籽粒长、宽、厚及籽粒最大体积,苏玉 30 增加幅度分别为 12.58%、14.25%、26.33%、2.39%、15.20%;苏玉 20 为 15.21%、29.90%、22.96%、9.84%、22.87%;苏玉 29 为 16.21%、25.10%、32.25%、10.33%、24.43%,过高和过低施氮均降低。表 4 表明,籽粒形态学结构间存在良好的相关关系,且产量分别与籽粒充实度、粒长、粒宽及籽粒最大体积呈现极显著相关关系,与籽粒的厚度无显著相关关系。说明通过施氮增大粒长、粒宽可有效增大棒子直径,提高产量。

表 3　施氮水平对籽粒形态学结构的影响

Table 3　Effects of nitrogen treatments on the morphology structure of grain

品种 Hybrid	施氮处理 N Treatment (kg/hm^2)	籽粒充实度 Grain filling degree (g/L)	籽粒几何形态 (mm) The geometrical morphology of grain			籽粒最大体积 Maximum size of grain (mm^3)
			长 Length	宽 Width	厚 Thickness	
苏玉 30 Suyu30	0	1065 d	9.59 c	6.91 d	5.29 a	21.80 c
	360	1088 cd	10.19 b	8.12 c	4.65 c	22.96 b
	405	1145 b	10.00 b	8.10 c	4.59 c	22.69 b
	450	1199 a	10.96 a	8.73 ab	5.42 a	25.11 a
	495	1167 ab	10.91 a	9.09 a	4.95 b	24.95 a
	540	1096 c	10.91 a	8.65 bc	4.79 bc	24.36 a
	均值 Mean	1126.67	10.43	8.27	4.95	23.65
苏玉 20 Suyu20	0	1032 d	9.19 d	8.51 d	5.01 c	22.71 d
	360	1082 bc	10.49 bc	9.59 c	5.25 bc	25.32 c
	405	1127 b	10.83 b	9.66 c	5.19 c	25.67 c
	450	1189 a	11.93 a	10.46 a	5.51 a	27.9 a
	495	1145 ab	11.07 ab	10.31 ab	5.39 a	26.78 b
	540	1062 c	10.85 b	9.79 bc	5.34 ab	25.98 c
	均值 Mean	1106	10.73	9.72	5.28	25.73
苏玉 29 Suyu29	0	1049 d	9.83 d	8.19 d	5.00 bc	23.02 d
	360	1082 d	10.84 c	9.35 c	4.89 c	25.09 c
	405	1131 c	11.22 bc	9.64 c	5.12 b	25.98 bc
	450	1219 a	12.29 a	10.83 a	5.52 a	28.64 a
	495	1159 bc	12.29 a	10.54 a	5.41 a	28.23 a
	540	1128 c	11.41 b	9.71 bc	5.21 ab	26.34 b
	均值 Mean	1128	11.31	9.71	5.19	26.22
F 值 *F*-value	品种 Cultivar	36.48**	142.51**	119.72**	4.65*	47.56**
	氮水平 N rate	35.63**	223.80**	54.68**	4.14*	36.44**
	品种×氮水平 Cultivar×N rate	11.05**	13.12**	1.20	1.05	1.16

注(Note):同列数据后内不同字母者表示相同品种不同氮处理间在 0.05 水平上差异显著 For the same cultivation, values followed by different letters in a column are significantly different among different N reatments at $P < 0.05$; *, ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著 Significantly different at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

表4 玉米产量及籽粒形态结构间的相关分析

Table 4 Correlations analysis between yield and the morphology structure of grain

籽粒形态 Grain morphology	充实度 Grain filling degree	长 Length	宽 Width	厚 Thickness	籽粒最大体积 Maximum size	产量 Yield
充实度 Grain filling degree	1					
长 Length	0.76**	1				
宽 Width	0.55*	0.85**	1			
厚 Thickness	0.42	0.56*	0.60**	1		
籽粒最大体积 Maximum size	0.67**	0.95**	0.96**	0.69**	1	
产量 Yield	0.84**	0.90**	0.78**	0.36	0.84**	1

注(Note): *, ** 分别表示在0.05和0.01水平上差异显著 Indicate correlations are significant at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

2.3 施氮水平对超高产夏玉米茎系、叶系结构的影响

表5表明,施氮水平对株高、穗位高的影响不明显,对茎粗、倒伏率及棒三叶叶夹角影响较大。表现为适量施氮(N 450 kg/hm^2)显著增大了茎粗、棒三叶叶夹角、降低了倒伏率。与对照(0 kg/hm^2)相比,450 kg/hm^2 施氮水平增加茎粗、棒三叶叶夹角(上、中、下)的幅度(降低了苏玉20品种穗位下一叶的叶夹角),苏玉30分别为42.93%、13.43%、36.48%、78.08%;苏玉20为35.43%、-10.28%、17.40%、11.07%;苏玉29为32.77%、41.26%、45.79%、47.46%。通过施氮改善茎系、叶系组成及形态生理特征可为玉米群体截获并转化更多光能奠定了基础。

2.4 施氮水平对超高产夏玉米茎秆节间长度的影响

三个品种的节间长度对施氮水平的响应程度虽有所差异,但基本趋势一致(表6)。与对照(0 kg/hm^2)相比,450 kg/hm^2 施氮水平显著增大了第一、二、三、四节间的长度,减少了穗位三节间(第七、八、九节间)的长度。施氮水平和品种及其互作效应对第一、二、三、四及穗位三节间(第七、八、九节间)长度呈现极显著影响,但对第五、六节间长度影响较小。由表7可知,每一节间的伸长受前一节间长度影响较大,表现出了显著、极显著的相关关系,但至穗位节间后这种关系消失。产量和茎粗与第一、二、三节间长分别表现极显著、显著正相关关系,与第七节间长度分别表现为显著、极显著负相关关系,而二者与其他节间长度关系不显著。由此可得,在第一、二、三、七节间伸长时期,通过氮肥运筹调节其长度可能是获得玉米超高产的一个重要途径。

3 讨论

3.1 施氮水平对超高产夏玉米产量及构成的影响

早期学者通过杂交优势在玉米上的应用,使其在穗粒数方面取得了突破,极大地提高了当时的玉米产量。近期,诸多学者通过培育耐密、耐肥、高抗、紧凑型品种和肥料运筹[16-17]、密植[18]、耕作方式[19-21]等栽培措施增加了群体总粒数获得了玉米的进一步高产。陈国平等[2]总结了我国近年159块超高产夏玉米(≥15000 kg/hm^2)田后指出,提高单位面积产量主要依靠增加密度(穗数),同时增加或稳定穗粒重。穗粒重的提高主要依靠增加穗粒数。本研究表明,在密植条件(82500 plant/hm^2)下,氮素对产量的影响主要依赖于增加穗粒重。这与霍中洋等[22]在水稻上的研究结果相似。由籽粒产量(Y)与施氮量(X)的关系确定了三个品种的最佳施氮量、最佳施氮范围、超高产施氮范围,苏玉30分别为461.3、412.3～510.2、447.1～475.5 kg/hm^2;苏玉20分别为463.8、416.4～511.2、415.6～512.0 kg/hm^2;苏玉29分别为452.8、413.8～491.9、379.2～526.9 kg/hm^2。

3.2 施氮水平对玉米籽粒形态学结构的影响

"扩库、强源、畅流"是玉米超高产栽培技术的目标。目前虽无充分的证据证明玉米籽粒的形态学特征与产量存在必然的联系,但这些特征在生产上却常常被作为高产玉米品种的依据。玉米籽粒深度(粒长)、百粒重等产量性状为典型的数量性状,受微效多基因控制、遗传力较低,且易受环境效应的

表 5　不同施氮水平对茎、叶系结构的影响

Table 5　Effects of nitrogen levels on characteristics of stems and leaves of maize

品种 Hybrid	施氮处理 N Treatment (kg/hm²)	株高 Plant high (cm)	穗位高 Ear height (cm)	茎粗 Stem diameter (mm)	倒伏率 Lodging rate (%)	棒三叶叶夹角(°) The angle of ear position leaf		
						上 Above	中 Middle	下 Below
苏玉 30 Suyu30	0	211.8 b	82.5 c	14.6 d	1.92 a	40.2 d	60.3 d	40.6 e
	360	232.9 a	93.1 b	18.7 c	1.26 b	41.8 cd	70.5 c	60.5 d
	405	238.9 a	91.1 b	19.1 b	1.22 b	42.3 bc	72.3 c	65.9 c
	450	239.9 a	99.7 a	20.9 a	1.08 c	45.6 a	82.3 a	72.3 a
	495	241.2 a	99.5 a	20.6 a	1.23 b	43.5 b	80.6 a	71.2 a
	540	241.3 a	98.5 a	18.5 c	1.23 b	38.2 e	75.6 b	68.9 b
	均值 Mean	234.3	94.1	18.7	1.32	41.9	73.6	63.2
苏玉 20 Suyu20	0	207.3 b	76.6 b	17.5 c	1.35 a	28.2 b	36.2 c	27.1 c
	360	231.2 a	91.7 a	19.8 b	1.24 b	22.1 c	40.4 b	28.5 c
	405	231.5 a	91.9 a	20.9 b	1.31 a	23.3 c	41.3 b	31.3 b
	450	230.9 a	91.1 a	23.7 a	1.24 b	25.3 a	42.5 b	30.1 b
	495	231.6 a	91.6 a	24.9 a	1.21 b	25.5 a	42.2 b	35.6 a
	540	232.2 a	92.8 a	23.8 a	1.12 c	23.7 c	44.3 a	36.8 a
	均值 Mean	227.5	89.3	21.8	1.25	24.7	41.2	31.6
苏玉 29 Suyu29	0	211.1 c	78.8 b	17.7 d	1.11 c	14.3 d	29.7 d	17.7 d
	360	238.3 b	94.5 a	19.5 c	1.17 b	15.3 c	30.3 c	20.3 c
	405	234.4 b	94.6 a	22.6 b	1.19 b	16.7 b	36.3 b	20.7 c
	450	241.9 ab	93.4 a	23.5 a	1.22 b	20.2 a	43.3 a	26.1 b
	495	242.2 a	93.4 a	21.4 b	1.31 a	19.7 a	37.3 b	25.2 b
	540	249.3 a	95.3 a	19.8 c	1.28 a	15.7 c	37.8 b	35.3 a
	均值 Mean	236.2	91.7	20.8	1.21	17	35.8	24.2
F 值 *F*-value	品种 Cultivar	94.92**	92.12**	154.49**	59.83**	37.84**	31.85**	143.07**
	氮水平 N rate	29.34**	25.83**	144.34**	38.64**	24.44**	1018.85**	2757.35**
	品种×氮水平 Cultivar×N rate	2.46*	4.17**	13.14**	68.42**	43.27**	3.90**	34.48**

注(Note):同列数据后内不同字母者表示相同品种不同氮处理间在 0.05 水平上差异显著 For the same cultivation, values followed by different letters in a column are significantly different among different N reatments at $P < 0.05$; *, ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著 Significantly different at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

影响。本研究证明,在密植(82500 plant/hm²)条件下,施肥可有效调节籽粒充实度、籽粒几何形态及籽粒最大体积等籽粒形态学特征。在籽粒个体间的灌浆竞争加剧时期,相对于顺穗行方向,籽粒扩容主要以向垂直于穗行方向扩张的方式为主,表现为产量与籽粒充实度、粒长、粒宽及籽粒最大体积呈现极显著相关关系,而与籽粒厚度的相关关系不显著,直接表现为超高产玉米穗棒直径增大,达到了“扩库”的目的。

表6 不同施氮水平对玉米节间长度的影响

Table 6 Effects of nitrogen levels on the length of each internode of maize

品种 Hybrid	氮处理 N rate (kg/hm²)	果穗位下各节间长度 (cm) Internodes length below ear						果穗位三节间长度 (cm) Internode length near ear		
		一 1st	二 2nd	三 3rd	四 4th	五 5th	六 6th	七 7th	八 8th	九 9th
苏玉30 Suyu30	0	6.1 d	7.3 d	7.1 c	14.1 c	17.1 a	17.5 a	19.5 a	13.0 d	15.5 b
	360	6.9 b	12.5 b	12.6 ab	13.5 b	15.9 b	16.5 b	19.0 b	14.5 c	15.0 b
	405	7.3 a	12.2 b	11.7 b	13.0 b	15.8 b	16.2 bc	17.5 b	15.0 b	17.0 a
	450	9.9 a	13.8 a	12.0 b	13.8 ab	14.0 c	15.6 c	16.5 b	10.8 e	15.8 b
	495	7.3 b	12.8 b	13.2 a	14.2 a	15.3 b	15.9 c	16.5 ab	16.0 a	16.7 a
	540	7.4 b	11.2 c	12.2 b	14.2 a	16.6 a	15.5 c	16.5 a	15.0 b	15.0 b
	均值 Mean	7.5	11.6	11.5	13.8	15.8	16.2	17.6	14.1	15.8
苏玉20 Suyu20	0	4.8 d	8.9 d	7.9 c	9.1 b	12.2 c	14.8 ab	15.9 b	15.0 b	14.0 b
	360	5.8 c	9.9 c	9.5 b	11.5 a	13.7 a	15.2 a	16.9 a	16.0 a	15.5 a
	405	8.1 c	12.1 a	10.9 a	11.1 a	13.2 ab	15.0 a	15.3 b	13.5 d	15.0 a
	450	8.3 b	11.3 b	10.9 a	10.9 a	12.7 b	15.0 a	13.9 d	14.0 c	14.5 b
	495	8.3 b	11.1 b	10.8 a	11.0 a	12.9 b	15.2 a	13.9 c	14.0 c	14.2 b
	540	7.2 a	11.5 b	10.8 a	11.2 a	12.7 b	14.3 b	15.0 a	15.3 b	17.0 a
	均值 Mean	7.1	10.8	10.1	10.8	12.9	14.9	15.2	14.6	15.0
苏玉29 Suyu29	0	7.1 d	8.6 c	8.5 c	9.8 d	11.8 b	13.3 b	15.0 c	14.0 d	13.5 e
	360	9.6 c	9.9 b	10.5 b	11.9 c	12.8 a	14.2 a	16.9 a	17.0 a	17.0 a
	405	9.9 a	10.9 b	11.5 a	11.8 c	13.1 a	14.5 a	15.5 b	16.0 b	16.0 b
	450	11.1 a	11.4 a	11.4 a	12.8 b	13.4 a	12.9 b	14.3 d	14.0 d	15.5 c
	495	11.2 a	11.2 a	11.5 a	14.2 a	13.5 a	14.0 a	15.1 c	15.0 c	16.0 b
	540	11.8 b	10.9 b	11.6 a	13.0 b	13.5 a	14.5 a	15.2 b	15.0 c	14.5 d
	均值 Mean	10.1	10.5	10.8	12.3	13.0	13.9	15.3	15.2	15.4
F 值 *F*-value	品种 Cultivar	158.47**	20.14**	38.44**	146.75**	52.27**	0.19	93.56**	36.16**	12.79**
	氮水平 N rate	53.44**	51.74**	117.69**	18.39**	0.68	1.08	27.76**	57.28**	20.44**
	品种×氮水平 Cultivar×N rate	7.13**	7.98**	10.00**	8.43**	2.60*	1.10	3.51**	24.71**	20.67**

注(Note)：同列数据后内不同字母者表示相同品种不同氮处理间在0.05水平上差异显著 For the same cultivation, values followed by different letters in a column are significantly different among different N reatments at $P < 0.05$; *, ** 分别表示在0.05和0.01水平上差异显著 Significantly different at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively;七、八、九依次为下、中、上三个节间 7th, 8th, 9th are internodes from foot of plant near ear.

表 7　不同位置的节间长度、茎粗及产量间的相关性分析

Table 7　Correlations analysis between internode length, stem diameter and yield of maize

节间位置 Internodes from ear	一 1st	二 2nd	三 3rd	四 4th	五 5th	六 6th	七 7th	八 8th	九 9th	茎粗 Stem diameter	产量 Yield
一 1st	1										
二 2nd	0.36	1									
三 3rd	0.48*	0.90**	1								
四 4th	0.34	0.38	0.53*	1							
五 5th	-0.22	0.11	0.22	0.78**	1						
六 6th	-0.49*	0.06	-0.01	0.44	0.79**	1					
七 7th	-0.43	-0.15	-0.13	0.48*	0.76**	0.76**	1				
八 8th	-0.07	-0.18	0.11	-0.12	-0.11	-0.22	-0.01	1			
九 9th	0.16	0.35	0.38	0.47	0.29	0.15	0.30	0.35	1		
茎粗 Stem diameter	0.47*	0.53*	0.49*	-0.17	-0.49*	-0.46	-0.76**	0.04	0.14	1	
产量 Yield	0.72**	0.70**	0.75**	0.33	-0.11	-0.32	-0.49*	0.04	0.38	0.81**	1

注(Note):*, ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著 Correlations are significant at the 0.05 and 0.01 levels, respectively; 七、八、九依次为果穗位下、中、上三个节间 7th, 8th and 9th are the internodes below, middle and above the ear.

3.3　施氮水平对玉米植株形态学结构的影响

穗三叶和茎秆作为"强源"和"畅流"的重要器官,在生产中可以通过生长调节剂等手段调节节间长度及叶片的叶绿素含量。从 Mock[23] 和 Donald[24] 解释的"理想株型"为,在作物群体中,个体间竞争强度最小作物形态,其能最大限度地提高光能利用率,增加生物学产量和提高经济系数;到赵久然[25]和李登海[26]提出的"超级玉米"的理想株型是紧凑型、小雄穗、开叶距、坚茎秆、低穗位、大根系;再到对叶片及出叶速度[27]、不同部位叶片角度[28-30]等的探讨;及近期更深入的研究认为密植对缩短玉米穗上节间、延长了穗下节间及遮阴对第三节间影响最大,可见诸学者对玉米植株形态学特征的兴趣。然而,前人的这些研究均未对超高产玉米的植株形态学指标做出详细的阐述。本研究表明,450 kg/hm^2 施氮水平显著增大了茎秆第一、二、三节间长度、茎粗及棒三叶叶夹角角度,缩短了穗位三节间(第七、八、九节间)的长度。产量和茎粗与第一、二、三节间长度分别表现极显著、显著正相关关系,与第七节间长度分别表现为显著、极显著负相关关系,而二者与其他节间长度关系不显著。每一节间的伸长受前一节间长度影响较大,表现了显著、极显著的相关关系,但至穗位节间后这种相关关系消失。生产上可以通过施肥准确调控各节间的长度,达到"强源、畅流"的目的,最终提高玉米产量。

4　结论

适量施氮可显著提高玉米籽粒产量,产量随着施氮量的增多呈抛物线关系,450 kg/hm^2 施氮水平下产量最高,且对穗粒重影响最大,对容重影响最小,其变幅分别为 168.53%、8.11%。450 kg/hm^2 施氮水平增大了粒长、粒宽及棒三叶叶夹角角度,延长了茎秆第一、二、三节间的长度,缩短了穗位三节间(第七、八、九节间)的长度,氮肥水平对籽粒厚度影响不显著。每一节间的伸长受前一节间长度影响较大,表现出显著、极显著的相关关系,但至穗位节间后这种相关关系消失。产量和茎粗与第一、二、三节间长度分别表现为极显著、显著正相关关系,与第七节间长度分别表现为显著、极显著负相关关系,而二者与其他节间长度关系不显著。

参 考 文 献:

[1]　韩长赋. 玉米论略[J]. 农业经济问题, 2012, (6): 4-8.
Han C F. The analysis of maize[J]. Issues Agric. Ecol., 2012, (6): 4-8.

[2]　陈国平, 高聚林, 赵明, 等. 近年我国玉米超高产田的分布、

产量构成及关键技术[J]. 作物学报, 2012, 38(1): 80-85.
Chen G P, Gao J L, Zhao M *et al*. Distribution, yield structure, and key cultural techniques of maize super-high yield plots in recent years[J]. Acta Agron. Sin., 2012, 38(1): 80-85.

[3] 赵久然, 王荣焕. 美国玉米持续增产的因素及其对我国的启示[J]. 玉米科学, 2009, 17(5): 156-159, 163.
Zhao J R, Wang R H. Factors promoting the steady increase of american maize production and their enlightenments for China[J]. J. Maize Sci., 2009, 17(5): 156-159, 163.

[4] 杨吉顺, 高辉远, 刘鹏, 等. 种植密度和行距配置对超高产夏玉米群体光合特性的影响[J]. 作物学报, 2010, 36(7): 1226-1233.
Yang J S, Gao H Y, Liu P *et al*. Effects of planting density and row spacing on canopy apparent photosynthesis of high-yield summer corn[J]. Acta Agron. Sin., 2010, 36(7): 1226-1233.

[5] 王宜伦, 李朝海, 谭金芳, 等. 氮肥后移对超高产夏玉米产量及氮素吸收和利用的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(2): 339-347.
Wang Y L, Li C H, Tan J F *et al*. Effect of postponing N application on yield, nitrogen absorption and utilization in super-high-yield summer maize[J]. Acta Agron. Sin., 2011, 37(2): 339-347.

[6] 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 under super-high yield conditions[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2011, 17(4): 852-860.

[7] 王永军. 超高产夏玉米群体质量与个体生理功能研究[D]. 山东泰安: 山东农业大学博士论文, 2008.
Wang Y J. Study on population quality and individual physiology function of super high-yielding maize (*Zea mays* L.) [D]. Shandong Taian: PhD disstiton, Shandong Agricultural University, 2008.

[8] Wang Y L, Liu T X, Tan J F *et al*. Effect of N fertilization on yield, N absorption and utilization of two species of super high-yielding summer maize[J]. Agric. Sci. Tech., 2012, 13: 339-342, 374.

[9] 齐文增, 刘惠惠, 李耕, 等. 超高产夏玉米根系时空分布特性[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(1): 69-76.
Qi W Z, Liu H H, Li G *et al*. Temporal and spatial distribution characteristics of super-high-yield summer maize root[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2012, 18(1): 69-76.

[10] 唐丽媛, 李从锋, 马玮, 等. 渐密种植条件下玉米植株形态特征及其相关性分析[J]. 作物学报, 2012, 38(8): 1529-1537.
Tang L Y, Li C F, Ma W *et al*. Characteristics of plant morphological parameters and its correlation analysis in maize under planting with gradually increased density[J]. Acta Agron. Sin., 2012, 38(8): 1529-1537.

[11] 崔海岩, 靳立斌, 李波, 等. 遮阴对夏玉米茎秆形态结构和倒伏的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(17): 3497-3505.
Cui H Y, Jin L B, Li B *et al*. Effects of shading on stalks morphology, structure and lodging of summer maize in field[J]. Sci. Agric. Sin., 2012, 45(17): 3497-3505.

[12] 刘仲发, 勾玲, 赵明, 等. 遮荫对玉米茎秆形态特征、穿刺强度及抗倒伏能力的影响[J]. 华北农学报, 2011, 26(4): 91-96.
Liu Z F, Gou L, Zhao M *et al*. Effects of shading on stalk morphological characteristics, rind penetration strength and lodging-resistance of maize[J]. Acta Agric. Bor.-Sin., 2011, 26(4): 91-96.

[13] 赵晓燕. 玉米穗位叶宽与茎粗相关性的初步研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27(9): 126-132.
Zhao X Y. Preliminary research of the correlation of maize stem-diameter and ear-leaf breadth[J]. Chin. Agric. Sci. Bull. 2011, 27(9): 126-132.

[14] 张伟强, 库丽霞, 张君, 等. 玉米出籽率、籽粒深度和百粒重的 QTL 分析[J]. 作物学报, 2013, 39(3): 455-463.
Zhang W Q, Ku L X, Zhang J *et al*. QTL analysis of kernel ratio, kernel depth, and 100-kernel weight in maize(*Zea mays* L.)[J]. Acta Agron. Sin., 2013, 39(3): 455-463.

[15] 牛远, 徐宇, 李广军, 等. 大豆籽粒大小和粒形的驯化研究[J]. 大豆科学, 2011, 31(4): 522-528.
Niu Y, Xu Y, Li G J *et al*. Domestication of seed size and shape traits in soybean[J]. Soyb. Sci., 2012, 31(4): 522-528.

[16] 王宜伦, 李朝海, 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.

[17] 叶君, 高聚林, 王志刚, 等. 施氮量对超高产春玉米花粒期叶片光合特性及产量的影响[J]. 玉米科学, 2011, 19(6): 74-77.
Ye J, Gao J L, Wang Z G *et al*. Effects of nitrogen on leaf photosynthesis and grain yield of super high-yield spring maize during the flowering and milking stages[J]. J. Maize Sci., 2011, 19(6): 74-77.

[18] 吴亚男, 齐华, 盛耀辉, 等. 氮肥对春玉米光合特性、干物质积累及产量的影响[J]. 玉米科学, 2011, 19(5): 124-127.
Wu Y N, Qi H, Sheng Y H *et al*. Effects of sowing density and applying nitrogenoous fertilizer on the photosynthesis capacity dry matter accumulation and yield of maize[J]. J. Maize Sci., 2011, 19(5): 124-127.

[19] 马丽, 李朝海, 付景, 等. 垄作栽培对高产田夏玉米光合特性及产量的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(23): 7141-7150.
Ma L, Li C H, Fu J *et al*. Effects of planting on the photosynthetic characteristics and yield of summer maize in high-yield field[J]. Acta Ecol. Sin., 2011, 31(23): 7141-7150.

[20] 梁书荣, 赵会杰, 李洪岐, 等. 密度、种植方式和品种对夏玉米群体发育特征的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(7):

1927-1931.
Liang S R, Zhao H J, Li H Q *et al*. Effects of planting densities and modes on developmental characteristics of summer maize populations in two varieties[J]. Acta Ecol. Sin., 2010, 30(7): 1927-1931.

[21] 陈传永，侯海鹏，赵明，等. 种植密度对不同玉米品种叶片光合特性与碳、氮变化的影响[J]. 作物学报，2010，36(5)：871-878.
Chen J Y, Hou H P, Zhao M *et al*. Effects of panting density on photosynthetic characteristics and changes of carbon and nitrogen in leaf of different dorn hybrids[J]. Acta Agron. Sin., 2010, 36(5): 871-878.

[22] 霍中洋，姚义，张洪程，等. 播期对直播稻光合物质生产特征的影响[J]. 中国农业科学，2012，45(13)：2592-2606.
Huo Z Y, Yao Y, Zhang H C *et al*. Effect of sowing date on characteristics of photosynthesis and matter production of direct seeding rice[J]. Sci. Agric. Sin., 2012, 45(13): 2592-2606.

[23] Mock J J, Pearce R B. An ideotype of maize[J]. Euphytica, 1975, 24: 613-623.

[24] Donald C M. The breeding of crop ideotypes[J]. Euphytica, 1968, 17: 385-403.

[25] 王元东，段民孝，邢锦丰，等. 玉米理想株型育种的研究进展与展望[J]. 玉米科学，2008，16(3)：47-50.
Wang Y D, Duan M X, Xing J F *et al*. Progress and prospect in ideal plant type breeding in maize[J]. J. Maize Sci., 2008, 16(3): 47-50.

[26] 李登海，张永慧，翟延举，等. 玉米株型在高产育种中的作用[J]. 山东农业科学，1992，(3)：4-8.
Li D H, Zhang Y H, Zhai Y J *et al*. The role of maize plant type in high yield breeding[J]. Shandong Agric. Sci., 1992, (3): 4-8.

[27] 张洪晶，黄海，崔丹，等. 超高产与普通玉米叶片生长动态变化比较研究[J]. 当代生态农业，2011，3(4)：1-4.
Zhang H J, Huang H, Cui D *et al*. Studies on the growth pattern between of leaves super high-yield maize and common maize[J]. Con. Eco-agric., 2011, 3(4): 1-4.

[28] Austin R B. Genetic variation in photosynthesis (Review)[J]. Agric. Sci., 1989, 112: 287-294.

[29] Duncan W G. Net photosynthetic rate, relative, leaf growth rate and leaf numbers of 22 races of maize grown eight temperature[J]. Crop Sci., 1968, 8: 670-674.

[30] 鲍巨松，薛吉全，杨成书，马国胜. 不同株型玉米品种高产潜力及特征的研究[J]. 玉米科学，1994，2(2)：48-51.
Bao J S, Xue J Q, Yang C S, Ma G S. Studies on high-yield potential and its characteristics of corn varieties with different plant-type[J]. J. Maize Sci., 1994, 2(2): 48-51.