

密度、氮肥对玉米杂交种节根数量的影响

程帅, 李鹏程, 刘志刚, 赵龙飞, 米国华, 袁力行, 陈范骏*

(中国农业大学资源与环境学院, 教育部植物-土壤相互作用重点实验室, 北京 100193)

摘要:【目的】玉米地上和地下茎节生长的节根分别被定义为地上节根(气生根)和地下节根;地上和地下节根在玉米生长全生育期的水分、养分吸收以及抗倒伏方面起重要作用。密度和氮肥施用是作物生长和高产最为关键的两个农学影响因子,研究高产密植栽培中氮素如何影响玉米地上及地下节根数的变化,可为选择适宜的品种提供依据。【方法】以玉米自交系 GEMS30、Zheng653、Mo17、B73、CIMBL153 为母本,以武 312(Wu312)及其近等基因系为父本组配的 10 对测交组合为试验材料,在 2 个密度水平(60000 和 80040 plant/hm²)和 3 个氮水平(0、120 和 240 kg/hm²)下,通过田间挖根,然后按照玉米生长的轮次逐一割下节根并记录数量,同时利用 NK-100 型数显式弹簧拉力计测定地上第 3 节位的抗倒拉力。研究总节根数、地上节根数(气生根)、地下节根数、茎秆抗倒拉力和产量的变化规律及其相互关系。【结果】本研究条件下,高密度显著降低产量;供氮水平也显著影响产量,N 120 kg/hm² 时产量高于 N 0 和 240 kg/hm²。地上节根和地下节根数均受氮肥、密度及氮肥密度互作的显著影响。高密种植平均使地上节根数减少 3~6 条,而地下节根数量不受影响;抗倒拉力降低 14%~29%,但是在 N 240 kg/hm² 条件下,高密度对地上和地下节根数的影响不显著。在 N 120 kg/hm² 供应条件下的地上和地下节根数、抗倒拉力均高于不施氮,低密度下玉米地上节根数也高于 N 240 kg/hm²。不同杂交种的地上节根对氮和密度的响应存在显著差异,其中以 B73 为母本的 2 个基因型最为敏感。相关分析表明,在 N 0 和 N 120 kg/hm² 条件下,无论密度高低,地下节根数与产量都呈显著正相关;在低密度下 N 0 和 N 120 kg/hm² 条件下,地下节根数与抗倒拉力呈显著正相关。但高密度在 N 0 下,地上节根数与产量呈显著负相关。【结论】在适宜栽培条件下,地下和地上节根数量多,抗倒能力强,产量高,地下节根数对产量和抗倒伏的贡献相对更为重要。在胁迫条件下,过多的地上节根数可能对产量形成起负作用。因此,根据目标产量,在适宜栽培条件下,选择地下节根数多的品种可以提高产量和抗倒伏率。

关键词: 玉米; 施氮量; 密度; 节根; 抗倒拉力; 产量

中图分类号: S513.01; S513.062

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2016)04-1118-08

Effect of plant density and nitrogen supply on nodel root number of maize of different varieties

CHENG Shuai, LI Peng-cheng, LIU Zhi-gang, ZHAO Long-fei, MI Guo-hua, YUAN Li-xing, CHEN Fan-jun*

(College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University/Key Lab of Plant-Soil Interaction, MOE, Beijing 100193)

Abstract: 【Objectives】 Brace and crown roots play dominant role in supporting plants and water and nutrient uptake during the whole growth period of maize. Plant density and nitrogen (N) supply are two important factors on maize growth and yield production, study their effects on the growth of brace and crown roots will provide base for the choose of proper cultivars. 【Methods】 In this study, 10 maize hybrids, crossed from female inbred lines GEMS30, Zheng653, Mo17, B73, CIMBL153 and male lines Wu312 and Wu312 derivative lines, were grown in filed under two plant densities (60000 and 80040 plants per hm²). Three N supply levels of 0, 120 and 240 kg/hm² were designed for the two densities. The variation of the number of brace and crown roots was counted by hand after the whole roots were dug out. The pulling resistance of the stalk was measured at the same time.

收稿日期: 2015-01-27

接受日期: 2015-06-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(31172015); 973 项目(2015CB150402)资助。

作者简介: 程帅(1989—), 女, 山东德州人, 硕士, 主要从事植物营养生理与遗传研究。E-mail: chengshuaichsh@163.com

* 通信作者 Tel: 010-62734454; E-mail: caucfj@cau.edu.cn

【Results】 The grain yields were lower in high plant density than in low density, and lower in N 0 or N 240 kg/hm² than in N 120 kg/hm². N application rate, plant density and their interaction significantly affected the number of brace and crown roots. At high plant density, the number of brace roots was decreased by 3–6, the pulling resistance was decreased by 14%–29%, while the number of the crown roots was not affected. The highest number of brace roots and crown roots, as well as the strongest stalk pulling resistance were obtained under N 120 kg/hm². There was genotypic difference in the number of brace roots in response to N supply and plant density. Two hybrids crossed from B73 as the female parent were mostly sensitive to N supply. Under 0 and N 120 kg/hm², the number of brace roots was positively correlated to grain yield regardless the plant density. Under high plant density without N supply, the number of brace roots was negatively correlated to grain yield. Under low plant density without N or with N 120 kg/hm², the number of crown roots was positively correlated to stalk pulling resistance. The most satisfactory number of the brace and crown roots, the stalk pulling resistance and the grain yield were obtained under low planting density and N 120 kg/hm² supply. **【Conclusions】** In suitable production condition, more brace roots are good for high pulling resistance and high yield, but under stress condition, excess brace roots would inhibit the formation of maize yield. So the response of brace root number to stress should be considered for the choose of hybrids to obtain target yield.

Key words: maize; nitrogen supply; plant density; brace root; crown root; pulling resistance; yield

根系是作物吸收养分、水分的重要器官。根系的生长受到多种因素的影响,如土壤温度、水分、养分状况等^[1]。苗期以后,玉米茎节处发生的茎生根(节根)构成了成熟植株的根系,在抗倒伏和水分、营养物质吸收中起着重要的作用^[2]。在玉米生产中,增加群体密度是获得大面积高产的重要措施之一^[3-4]。但种植密度增加加剧了根系对养分、水分和生长空间的竞争^[1],影响根系的生长,进而影响产量。不少学者认为,增加节根数量可以提高作物养分效率或产量^[5-7]且有学者提出地上节根(气生根)对增强抗倒伏能力起着重要作用^[8-9]。因此研究不同氮水平及密度处理下地上及地下节根数量的变化趋势,可帮助理解根系在玉米高产中的作用,为生产实践中调控根系,并促进养分吸收、提高抗倒等提供理论依据。

有关密度对根系的影响已有不少研究,如刘镜波等^[10]研究发现,随种植密度的增加,玉米地上节根(气生根)数量与总根数量明显减少。在Saengwilai等^[11]的研究中发现缺氮胁迫显著降低了玉米节根数以及总根数。而氮肥与密度互作对玉米节根数量的影响缺乏研究,对地上和地下节根数的影响是否存在不同?以及与产量的关系如何?因此本研究利用10个杂交组合,在2个密度、3个氮肥处理条件下,探讨密度与氮肥处理对地上及地下节根数量的影响,以及与产量形成的关系,为玉米高产高效栽培管理及育种选育提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料以玉米自交系 GEMS30、Zheng653、Mo17、B73、CIMBL153 为母本,以武 312 (Wu312) 及其近等基因系 Wu312-1 为父本组配的 10 对测交杂交组合,其中母本自交系由中国农业大学玉米中心和华中农业大学国家遗传改良重点实验室提供,武 312 引自中国农业科学院种质资源库。

1.2 试验设计

试验在北京中国农业大学上庄实验站进行,实验站位于北纬 40°06′、东经 116°11′。土壤基础理化性质见表 1。

采用随机区组裂区设计,氮肥为主处理,密度为副处理。氮肥处理设置 3 个水平,分别为 N 0、120、240 kg/hm² (分别记作 N0、N120、N240),密度处理为 2 个,低密(LD)为 60000 plant/hm²,行距 0.5 m,株距 0.33 m,高密(HD)为 80040 plant/hm²,行距 0.5 m,株距 0.25 m,3 次重复,每个小区为 5 行区(收获期测定中间 3 行产量),小区面积为 10 m²。

1.3 田间管理

播期为 2014 年 5 月 19 日,基肥施用 P₂O₅ 90 kg/hm²、K₂O 120 kg/hm²。随后按照密度要求进行人工播种。氮肥 2/3 做基肥,1/3 在拔节后进行追施。7 月中旬降雨量偏少,较为干旱,未灌水。

表 1 上庄实验站土壤基础理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil in Shangzhuang experimental station

氮水平 N supply	无机氮 (mg/kg) Nmin(NO ₃ ⁻ + NH ₄ ⁺)	速效钾 (mg/kg) NH ₄ Ac-K	有效磷 (mg/kg) Olsen-P	有机质 (g/kg) Organic matter	pH
N0	11.0	60.7	25.9	8.0	7.2
N120	15.0	62.9	23.6	8.0	7.4
N240	30.3	65.7	17.1	10.5	7.2

1.4 测定方法

吐丝期每个小区挑选具有代表性的植株 6 株,测定地上第 3 节位的抗倒拉力,利用 NK-100 型数显式弹簧拉力计与茎秆垂直连接,作用点为第 3 节间中部^[12],用手匀速拉动弹簧拉力计并与茎秆保持垂直,直至茎秆倾斜 45 度角^[13]。

成熟期籽粒全部收获测产,随后每小区选取代表性植株 5 株进行节根数量的调查。以单株根系所占面积(1/2 株距,1/2 行距),深度为 0.4 m 将植株整体挖取。根系用工具刀按照玉米生长的轮次逐一割下,地上茎节生长的节根为地上节根,其下为 0 层,即地下节根与土壤交界面处,0 层以下为地下节根^[14]。

1.5 数据处理

数据用 Excel 进行分析,采用 SPSS 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同供氮、不同密度条件下玉米节根数、抗倒拉力及产量的方差分析

氮肥、密度及品种间在地上节根、地下节根、抗倒拉力以及产量均存在显著或极显著的差异(表 2)。地上、地下节根数存在氮处理与密度、氮处理与品种间显著的交互作用,而抗倒拉力只存在氮处理与品种间显著的交互作用。地上节根还存在氮处理、密度、品种三因素间显著的交互作用。

表 2 不同供氮、密度处理下不同玉米基因型节根数量、抗倒拉力及产量的方差分析

Table 2 Variance analysis on the number of brace and crown roots, stalk pulling resistance, and grain yield of different maize cultivars grown under different nitrogen and plant density

变异来源 Source of variation	地上节根数 Brace root number	地下节根数 Crown root number	抗倒拉力 Stalk pulling resistance	产量 Grain yield
氮处理 Nitrogen	277***	292***	40372***	33405251***
密度 Density	481***	38.7*	25273***	5314086**
品种 Cultivar	1489***	1649***	1963***	51265822***
氮处理 × 密度 N × Density	205***	104***	1309	2240296
氮处理 × 品种 N × Cultivar	658***	604***	1391**	11153231
密度 × 品种 Density × Cultivar	120	124	312	4200747
氮处理 × 密度 × 品种 N × Density × Cultivar	341*	145	803	8301079

注(Note): *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$; ***— $P < 0.001$ 。

2.2 供氮水平、密度对不同基因型玉米地上节根数量的影响

表 3 表明,地上节根在 N120 水平下达到最大值,且 N120 水平地上节根数量显著多于 N0 水平,与 N240 水平节根数无显著差异。在低密条件下,地上节根数在 N120 水平达到最大值,比 N0 或 N240 水平显著增加 4~5 条;高密条件下,N120 与 N240 水平的节根数无显著差异,均显著高于 N0

水平。

密植条件下,地上节根数平均减少 3 条,其中 N0 胁迫和 N120 水平下,显著减少 3~6 条,而 N240 水平条件下则无显著变化。

不同品种地上节根数对氮和密度的响应存在显著差异,其中以 B73 × Wu312-1 对供氮和增密最为敏感,低密度 N120 水平条件下,地上节根数相对低密度 N0 水平增加了 13 条,增加幅度达 397%,而相对

表3 不同供氮水平、密度下不同品种玉米地上节根数量
Table 3 Number of brace roots in different maize cultivar under different N supply and plant density

项目 Item	低密度 Low density			氮处理差异显著性 N supply LSD _{0.05}	高密度 High density			氮处理差异显著性 N supply LSD _{0.05}
	N0	N120	N240		N0	N120	N240	
GEMS30 × Wu312 -1	12.2	12.9	13.0	2.9	9.6	8.8	6.7	7.9
GEMS30 × Wu312	12.5	14.0	10.6	3.7	9.2	10.2*	7.3	4.7
Zheng653 × Wu312 -1	11.9	14.5	6.5	6.5	4.3*	10.4	7.9	7.4
Zheng653 × Wu312	8.3	12.9	8.7	7.5	6.7	6.7	3.3	6.3
Mo17 × Wu312 -1	0.2	7.0	0.9	6.9	1.2	0.4	3.9	8.2
Mo17 × Wu312	1.6	5.3	0.0	6.1	0.0	0.7	6.3	6.4
B73 × Wu312 -1	3.3	16.4	12.4	5.9	0.5*	3.7*	15.3	8.5
B73 × Wu312	8.3	11.7	12.8	7.3	2.2	2.0*	12.1	5.8
CIMBL153 × Wu312 -1	6.3	15.2	11.4	3.7	8.9	11.9	8.8	4.9
CIMBL153 × Wu312	11.6	15.9	12.2	9.4	6.4	9.1	6.1	7.2
基因型间差异显著性 Genotypic difference LSD _{0.05}	4.3	5.5	4.5		3.7	4.1	7.7	
平均值 Mean	7.6	12.6	8.9	2.6	4.9*	6.4*	7.8	2.5
各密度平均值 Density	9.7				6.4*			
各氮水平平均值 Nitrogen	6.3	9.5	8.3	1.9				

注(Note): *、** 分别表示同一品种同一氮水平下不同密度间差异达5%、1%显著水平 Indicate significant difference between the plant densities within the same genotype and N treatment at $P < 0.05$ and $P < 0.01$ levels.

N240 水平变化不显著。高密度 N120 水平条件下,地上节根数相对高密度 N0 水平变化不显著,而高密度 N240 水平下相对高密度 N120 水平显著增加了 12 条,增幅达 314%。B73 × Wu312 也有相同的趋势。而高密度 N120 水平相对低密度 N120 水平,2 个品种的地上节根数减少了 10 ~ 13 条,降低幅度达 77% ~ 83%。

2.3 供氮水平、密度对不同品种玉米地下节根数量的影响

氮处理对地下节根数量影响显著(表 4),随着施肥量增加地下根数先显著增加之后显著减少,N 240 kg/hm² 的施肥量限制了地下节根的发生。说明在适宜施氮量(N 120 kg/hm²)条件下地下节根生长情况最佳。

在低密度条件下,地下节根数在 N120 水平达到最大值,较 N0 水平显著增加 3 条,N120 与 N240 水平地下节根数无显著差异;高密度条件下,N120 水平较 N0 或 N240 水平地下节根数显著增加 3 ~ 4 条,N0 与 N240 水平地下节根数没有显著差异。高密处理地下节根数量呈减少趋势,但不显著。

2.4 不同供氮水平、不同密度对玉米抗倒拉力的影响

影响

茎秆抗倒拉力在氮处理和密度处理间均表现显著差异(表 5)。无论在低密还是高密条件下,在 N120 水平下的抗倒拉力最高,比 N0 或 N240 水平平均高 31%。密植条件下,抗倒拉力平均降低 19%,其中 N240 水平下降低最大,达到 29%。说明在低密度施肥量为 N 120 kg/hm² 时茎秆抗倒伏能力最强。

不同品种抗倒拉力对氮和密度的响应存在显著差异。在低密度条件下,以 Zheng653 和 B73 为母本的测交种对供氮水平最为敏感,相对于 N0 和 N240 水平,N120 水平的抗倒拉力显著提高 22% ~ 41% 和 34% ~ 50%。高密度下 GEMS30 × Wu312 -1 和 Mo17 × Wu312 -1 对供氮水平不敏感,其余品种在 N120 水平降低幅度达 27% ~ 58%。高密度 N0 水平下,GEMS30 × Wu312 -1、GEMS30 × Wu312、Zheng653 × Wu312 -1 的抗倒拉力显著降低 24% ~ 46%,其余品种变化不显著;高密度 N240 水平下,Mo17 和 CIMBL153 为母本的测交种显著降低了 22% ~ 48% 和 65% ~ 79%。

表 4 不同供氮水平、密度下不同品种玉米地下节根数量的比较

Table 4 Effect of N supply and plant density on the number of crown roots in different maize cultivars

项目 Item	低密度 Low density			氮处理差异显著性 N supply LSD _{0.05}	高密度 High density			氮处理差异显著性 N supply LSD _{0.05}
	N0	N120	N240		N0	N120	N240	
	GEMS30 × Wu312 -1	28.3	30.7		32.6	2.9	29.4	
GEMS30 × Wu312	28.4	31.1	29.4	2.9	28.2	33.1	33.3	3.9
Zheng653 × Wu312 -1	32.0	37.9	37.5	5.7	31.9	34.9	30.9	4.3
Zheng653 × Wu312	29.1	33.6	37.1	3.5	31.8	33.5	30.3	8.6
Mo17 × Wu312 -1	33.9	36.8	40.1	3.0	32.6	36.9	32.2	7.0
Mo17 × Wu312	34.8	37.8	37.6	1.3	33.3	37.5	29.5	6.8
B73 × Wu312 -1	36.9	43.3	33.1	8.8	39.1	42.8	30.3	5.4
B73 × Wu312	39.8	40.0	31.7	6.5	38.7	41.3	32.4	5.3
CIMBL153 × Wu312 -1	26.6	29.1	29.9	3.5	27.7	28.5	28.1	4.7
CIMBL153 × Wu312	25.3	28.1	31.7	5.3	25.5	29.5	29.0	4.2
基因型间差异显著性 Genotypic difference LSD _{0.05}	4.6	2.8	3.9		4.4	3.6	5.7	
平均值 Mean	31.5	34.8	34.1	2.5	31.8	34.9	30.8	2.3
各密度平均值 Density	33.5				32.5			
各氮水平平均值 Nitrogen	31.7	34.9	32.4	1.7				

表 5 不同供氮水平、密度下不同品种玉米茎秆拉力的比较

Table 5 Effect of N supply and plant density on the pulling resistance of stalk in different maize cultivars

项目 Item	低密度 Low density			氮处理差异显著性 N supply LSD _{0.05}	高密度 High density			氮处理差异显著性 N supply LSD _{0.05}
	N0	N120	N240		N0	N120	N240	
	GEMS30 × Wu312 -1	117	136		137	72.9	75.8*	
GEMS30 × Wu312	108	127	102	35.9	83.6*	117	85.6	23.0
Zheng653 × Wu312 -1	135	173	117	29.3	88.7*	163	92.7	39.7
Zheng653 × Wu312	92.1	156	104	48.2	95.7	129	74.8	35.3
Mo17 × Wu312 -1	118	155	135	43.5	124	111	87.2*	27.5
Mo17 × Wu312	133	153	107	32.2	107	181	85.5*	54.1
B73 × Wu312 -1	121	211	140	69.8	113	161	98.8	47.4
B73 × Wu312	121	194	97.8	52.0	94.6	145	81.4	62.3
CIMBL153 × Wu312 -1	99.2	159	141	24.1	104	149	62.1*	54.6
CIMBL153 × Wu312	94.5	174	149	121	87.8	154	84.0*	49.2
基因型间差异显著性 Genotypic difference LSD _{0.05}								
平均值 Mean	114	164	123	13.8	97.4*	141*	87.5*	11.6
各密度平均值 Density	134				109*			
各氮水平平均值 Nitrogen	106	153	105	8.8				

注(Note): *、** 分别表示同一品种同一氮水平下不同密度间差异达5%、1%显著水平 Indicate significant difference between the plant densities within the same genotype and N treatment at $P < 0.05$ and $P < 0.01$ levels, respectively.

2.5 不同供氮水平、不同密度对玉米产量的影响

施氮和密植显著影响产量变化。在低密和高密条件下,在 N120 水平下产量比 N0 或 N240 水平平均高 40%。密植条件下,产量平均降低 13%,其中

N120 水平降低最大,达到 19%,其中以 Zheng653 和 B73 为母本的测交种的产量最高,且减产幅度较小,在 10% 左右;而 CIMBL153 和 GEMS30 为母本的测交种较低,且减产幅度达 24%~35%(表 6)。

表 6 不同供氮水平、密度下不同品种玉米产量的表现

Table 6 Effect of N supply and plant density on the grain yield of different maize varieties

项目 Item	低密度 Low density			氮处理差异显著性 N supply LSD _{0.05}	高密度 High density			氮处理差异显著性 N supply LSD _{0.05}
	N0	N120	N240		N0	N120	N240	
	GEMS30 × Wu312-1	2361	3677		2218	1090	1508	
GEMS30 × Wu312	1623	3317	2088	720	1479	2528*	2203	1073
Zheng653 × Wu312-1	2970	3962	3189	922	3130	3828	2674	986
Zheng653 × Wu312	2420	5043	3448	1885	3209	4369	2561	2103
Mo17 × Wu312-1	2197	3448	2404	1433	3199	3176	2371	2303
Mo17 × Wu312	2814	4469	2412	2900	2340	3225	2205	1330
B73 × Wu312-1	3122	4548	2698	1089	3065	3545	2745	1586
B73 × Wu312	4484	4313	3222	2274	3584	4057	3127	1963
CIMBL153 × Wu312-1	1923	3266	2055	2532	1323	2027	1499	2234
CIMBL153 × Wu312	2814	3095	2161	1845	1244*	2133	2609	3299
基因型间差异显著性 ₅ Genotypic difference LSD _{0.05}	1677	1206	1074		1379	1172	1375	
平均值 Mean	2673	3914	2590	498	2408	3165*	2454	512
各密度平均值 Density	3059				2676*			
各氮水平平均值 Nitrogen	2540	3539	2522	361				

注(Notes): *、** 分别表示同一品种同一氮水平下不同密度间差异达 5%、1% 显著水平 Indicate significant difference between the plant densities within the same genotype and N treatment at $P < 0.05$ and $P < 0.01$ levels, respectively.

2.6 节根数量与抗倒拉力、产量的相关性分析

相关分析表明,在 N0 和 N120 水平下,地下节根数与产量都呈显著正相关,在 N0 水平高密下,地上节根数与产量呈显著负相关;在低密度 N0 和

N120 水平下,地下节根数与抗倒拉力呈显著正相关,在 N0 高密下,抗倒拉力与地上节根数呈显著负相关(表 7)。

表 7 节根数量与抗倒拉力、产量的相关性分析($n=10$)

Table 7 Correlation coefficient between the number of nodal roots and pulling resistance and grain yield

氮水平 N supply	密度 Density	与产量相关性 Grain yield		与抗倒拉力相关性 Pulling resistance	
		地上节根数 Brace root No.	地下节根数 Crown root No.	地上节根数 Brace root No.	地下节根数 Crown root No.
		N0	LD	-0.125	0.726*
	HD	-0.696*	0.824**	-0.720*	0.452
N120	LD	-0.112	0.648*	0.381	0.655*
	HD	-0.476	0.662*	-0.135	0.296
N240	LD	-0.041	0.442	0.170	-0.067
	HD	0.303	0.526	0.137	0.499

注(Notes): *、** 分别表示 5% 水平、1% 水平显著 Indicate significant difference at $P < 0.05$ and $P < 0.01$ levels, respectively.

3 讨论

3.1 施氮量与节根数量、抗倒伏能力的关系

已有研究^[15-17]表明,根系在玉米氮高效吸收中起着重要作用,尤其是氮素供应强度不能匹配植株最大生长速率的情况下。根构型对土壤养分有效性改变的响应是其适应环境变化的一种重要机制。

在本研究中氮水平显著影响地上和地下节根的数量,随着施氮量的增加,节根数量呈增长趋势,施氮量超过 120 kg/hm² 后,节根数量无显著变化,甚至减少。表现出根系对土壤中养分有效性的响应和可塑性。这与 Wang 等^[18]、Chun 等^[19]以及 Gaudin 等^[20]的研究结果一致。N 120 kg/hm² 的地上和地下节根数各高于 N0 和 N240 水平 3 条左右,抗倒拉力显著高 30% 左右,且产量达到最高。说明,在适宜施氮量条件下,根系发育较好,有利于养分的吸收和产量的形成。过多施肥不仅会造成浪费,而且会抑制根系生长,造成养分效率降低。

3.2 密度与节根数量、抗倒伏能力的关系

群体密度的增大往往导致植株对光、肥、水的竞争^[21-22],进而影响根系的生长。密度对根系的影响在不同的体系下都有相关研究。戴俊英等^[23]的研究表明,根系对密度的响应表现为根系体积的减小,Pellerin 等^[14]指出密度处理使玉米根重、根长、总根数明显降低。程富丽等^[8]发现随着密度的增大,玉米根数及气生根数目减少,茎秆的抗倒能力下降。

本研究以 Pellerin 等^[14]根系分层为依据,将茎生根划分为地上节根和地下节根,分别研究密度对地上、地下节根的影响。研究表明,高密度处理使总节根数显著减少,主要表现为地上节根数显著减少 3~6 条,对地下节根影响不显著。高密度下抗倒拉力平均降低 19%,其中 N240 水平下降最大,达到 29%。同时,地上、地下节根数存在氮处理与密度显著的交互作用。在低密度条件下,地上、地下节根数在 N120 水平达到最大值,地上节根比 N0 或 N240 水平显著增加 4~5 条,地下节根较 N0 水平显著增加 3 条,N120 与 N240 水平地下节根数无显著差异。高密条件下,N120 与 N240 水平的地上节根数无显著差异,均显著高于 N0 水平 3 条左右,而 N120 水平较 N0 或 N240 水平地下节根数显著增加 3~4 条。

3.3 不同基因型对密度、氮处理的响应

根系是作物吸收水分、养分的重要器官,存在

着丰富的遗传变异^[2],不同基因型根系对养分、密度的响应程度各不相同。程富丽等^[8]的研究中,不同玉米品种根系数量对密度的响应存在显著差异,其中先玉 335 和浚单 20 随着密度增加,根条数下降幅度最大。Saengwilai 等^[11]认为,具有较少节根数的玉米基因型更适应低氮胁迫。丰光等^[24]利用 3 个代表性玉米品种农大 108、郑单 958 和先玉 335 研究玉米茎秆性状与倒伏的关系,发现气生根层数与倒伏性具有显著的相关性,可以作为衡量玉米倒伏的指标。程富丽等^[8]也发现根条数和气生根数目多的品种抗倒能力强。

本研究条件下,不同玉米基因型地上节根数对氮和密度的响应存在显著差异,其中以 B73 和 Zheng653 为母本的基因型最为敏感,以 B73 为母本的 2 个基因型 N0 或高密度胁迫下,地上节根减少了 10~13 条,降低幅度达 80% 左右。在 N0 和 N120 水平下,不同基因型的地下节根数与产量都呈显著正相关。在 N0 水平高密度条件下,地上节根数与产量呈显著负相关。在低密度 N0 和 N120 水平下,地下节根数与抗倒拉力呈显著正相关。因此,在育种实践中应注重对根系的选择,地下节根数量较大的基因型,产量潜力可能更高,抗倒能力更强。在氮胁迫密植条件下,过多的地上节根数可能对产量形成起负作用。

4 结论

玉米节根数量受密度、氮肥量、基因型的综合影响,高密度、氮素供应不足或过量均不利于节根发育。在 60000 plant/hm² 和 120 kg/hm² 施氮量条件下,地下和地上节根数量最多,抗倒能力最强,产量最高。在适宜栽培条件下,地下节根数对产量和抗倒伏的贡献相对更为重要。因此在生产中,根据目标产量,在最适栽培条件下,选择地下节根数多的品种可以提高产量和抗倒伏率。

参考文献:

- [1] 罗洋,岳玉兰,郑金玉,等. 玉米品种郑单 958 合理种植密度的研究[J]. 吉林农业科学, 2008, 33(6): 11-12.
Luo Y, Yue Y L, Zheng J Y, et al. Studies on proper planting density of maize variety 'Zhengdan 958' [J]. Journal of Jilin Agricultural Sciences, 2008, 33(6): 11-12.
- [2] Hochholdinger F, Tuberosa R. Genetic and genomic dissection of maize root development and architecture [J]. Current Opinion in Plant Biology, 2009, 12(2): 172-177.
- [3] 张永科,王立祥,杨金慧,等. 中国玉米产量潜力增进技术研

- 究进展[J]. 中国农学通报, 2007, 23(7): 267-269.
- Zhang Y K, Wang L X, Yang J H, *et al.* China maize potential yield developing technique advanced [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(7): 267-269.
- [4] 李洪, 王斌, 李爱军, 等. 玉米株行距配置的密植增产效果研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27(9): 309-313.
- Li H, Wang B, Li A J, *et al.* Effects of allocations of row-spacing on maize yield under different planting densities [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(9): 309-313.
- [5] Cai H G, Chen F J, Mi G H, *et al.* Mapping QTLs for root system architecture of maize (*Zea mays* L.) in the field at different stages [J]. Theoretical and Applied Genetics, 2012, 125(6): 1313-1324.
- [6] Bayuelo-Jiménez J S, Gallardo-Valdéz M, Pérez-Decelis V A, *et al.* Genotypic variation for root traits of maize (*Zea mays* L.) from the Purhepecha Plateau under contrasting phosphorus availability [J]. Field Crops Research, 2011, 121(3): 350-362.
- [7] Saifu F, Schulte auf'm Erley G, Horst W J. Assessment of root morphological traits of 16 tropical and four temperate maize cultivars for nitrogen efficiency in short-term nutrient solution experiments with the cigar roll and growth pouch methods [M]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2013. 17-21.
- [8] 程富丽. 密度和钾肥对夏玉米抗倒伏能力影响的研究 [D]. 保定: 河北农业大学硕士学位论文, 2010.
- Cheng F L. Effects of plant density, potash fertilizer on lodging resistance ability of summer maize [D]. Baoding: MS Thesis of Hebei Agricultural University, 2010
- [9] 李宁, 翟志席, 李建民, 等. 密度对不同株型的玉米农艺、根系性状及产量的影响[J]. 玉米科学, 2008, 16(5): 98-102.
- Li N, Zhai Z X, Li J M, *et al.* Effects of planting density on agricultural characters, root system characters and yield of different maize plant types [J]. Journal of Maize Science, 2008, 16(5): 98-102.
- [10] 刘镜波, 王小林, 张岁岐, 等. 有机肥与种植密度对旱作玉米根系生长及功能的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 31(6): 32-36.
- Liu J B, Wang X L, Zhang S Q, *et al.* Effect of organic fertilizer and planting density on root growth and function of maize in dry land [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 31(6): 32-36.
- [11] Saengwilai P, Tian X L, Lynch J. Low crown root number enhances nitrogen acquisition from low nitrogen soils in maize (*Zea mays* L.) [J]. Plant Physiology, 2014, 16(2): 581-589.
- [12] 薛金涛, 张保明, 董志强, 等. 化学调控对玉米抗倒性及产量的影响[J]. 玉米科学, 2009, 17(2): 91-94.
- Xue J T, Zhang B M, Dong Z Q, *et al.* Effect of chemical regulation on lodging and yield of maize [J]. Journal of Maize Science, 2009, 17(2): 91-94.
- [13] 李峰, 赵东华, 杨立全, 等. 玉米抗倒强度及其与植株性状相关性的初步研究[J]. 山东农业科学, 2013, 45(10): 24-28.
- Li F, Zhao D H, Yang L Q, *et al.* Preliminary study on maize lodging resistance intensity and its correlation with plant traits [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2013, 45(10): 24-28.
- [14] Pellerin S, Mollier A, and Plenet D. Phosphorus deficiency affects the rate of emergence and number of maize adventitious nodal roots [J]. Agronomy Journal, 2000, 92(4): 690-697.
- [15] Mackay A D, Barber S A. Effect of nitrogen on root growth of two genotypes in the field [J]. Agronomy Journal, 1986, 78(4): 699-703.
- [16] 春亮, 陈范骏, 张福锁, 米国华. 不同氮效率玉米杂交种的根系生长、氮素吸收与产量形成[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(5): 615-619.
- Chun L, Chen F J, Zhang F S, Mi G H. Root growth, nitrogen uptake and yield formation of hybrid maize with different N efficiency [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(5): 615-619.
- [17] Coque M, Gallais A. Genomic regions involved in response to grain yield selection at high and low nitrogen fertilization in maize [J]. Theoretical and Applied Genetics, 2006, 112(7): 1205-1220.
- [18] Wang Y, Mi G H, Chen F J, *et al.* Response of root morphology of nitrate supply and its contribution to nitrogen accumulation in maize [J]. Journal of Plant Nutrition, 2004, 27(12): 2189-2202.
- [19] Chun L, Mi G H, Li J S, *et al.* Genetic analysis of maize root characteristics in response to low nitrogen stress [J]. Plant and Soil, 2005, 276(1-2): 369-382.
- [20] Gaudin A C M, Mc Clymont S A, Holmes B M, *et al.* Novel temporal, fine-scale and growth variation phenotypes in root of adult-stage maize in response to low nitrogen stress [J]. Plant Cell & Environment, 2011, 34(12): 2122-2137.
- [21] Jiang W, Wang K J, Jiang G M, *et al.* Interplant root competition leads to an overcrowding effect in maize [J]. Canadian Journal of Plant Science, 2009, 89(6): 1041-1045.
- [22] Rossini M A, Maddonni G A, Otegui M E. Inter-plant competition for resources in maize crops grown under contrasting nitrogen supply and density: Variability in plant and ear growth [J]. Field Crops Research, 2011, 121(3): 373-380.
- [23] 戴俊英, 鄂玉江, 顾慰连. 玉米根系的生长规律及其与产量关系的研究. II 玉米根系与叶的相互作用及其与产量的关系 [J]. 作物学报, 1988, 14(4): 310-314.
- Dai J Y, E Y J, Gu W L. The studies on the relationship between root growth and yield. II. The interactions between maize root system and leaf of maize and its relationship with yield [J]. Acta Agronomica Sinica, 1988, 14(4): 310-314.
- [24] 丰光, 景希强, 李妍妍, 等. 玉米茎秆性状与倒伏性的相关和通径分析[J]. 华北农学报, 2010, 25(增刊): 72-74.
- Feng G, Jing X Q, Li Y Y, *et al.* Correlation and path analysis of lodging resistance with maize stem characters [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2010, 25(Suppl.): 72-74.