植物营养与肥料学报 2002,8(3):276～281
Plant Nutrition and Fertilizer Science

玉米杂交种氮效率基因型差异

刘建安[1],米国华[2],陈范骏[2],张福锁[2]
(1 中国农业科学院土壤肥料研究所,北京 100081;2 中国农业大学植物营养系,北京 100094)

摘要:利用北京地区推广的8个主要玉米杂交种,在不施N和施N条件下研究了产量、N累积量及N效率的基因型差异。结果表明,在不施N和施N条件下,不同品种之间产量的变异幅度分别为62%、57%;N累积总量的变异幅度则分别为55%、48%。其中以农大108的产量和N累积总量最高,中单120和中单2号最低。随施N量增加,吸收效率和N效率显著下降,利用效率则变化不大。在2个施N水平下,N效率基因型差异主要决定于吸收效率。

关键词:产量;N累积量;N效率;玉米杂交种
中图分类号:S602.4;S513　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1008-505X(2002)03-0276-06

Genotype differences on nitrogen use efficiency among maize hybrids

LIU Jian-an[1], MI Guo-hua[2], CHEN Fan-jun[2], ZHANG Fu-suo[2]
(*1 Soil and Fertilizer Institute, CAAS, Beijing 100081, China; 2 Dept. of Plant Nutrition, CAU, Beijing 100094, China*)

Abstract: A field experiment with eight maize hybrids cultivated mainly in Beijing was conducted to investigate the genotypic differences in grain yield, shoot N accumulation and N use efficiency under two N level conditions. The results showed that the variation range of grain yield among maize hybrids were 62% and 57%, total shoot N accumulation were 55% and 48%, respectively. Nongda 108 had the highest grain yield and shoot N accumulation, and Zhongdan 120 and Zhongdan 2 were the lowest ones. With increased N application, N uptake efficiency and N use efficiency decreased significantly, whereas N utilization efficiency almost the same. Genotypic variation in N use efficiency depended mainly on uptake efficiency at both N levels.

Key words: grain yield; shoot N accumulation; N use efficiency; maize hybrid

土壤缺N是作物获得高产的主要限制因素之一。施用N肥是玉米生产实践中必不可少的重要措施。目前我国玉米杂交育种及杂交种产量均已处于世界前列,但同时N肥过量施用也逐渐成为玉米生产中的严重问题,从而导致玉米产量增加的幅度远远低于N肥施用量上升的幅度[1,2],N肥利用率明显下降。另外,N肥的过量使用不但会造成农民的经济损失,而且可能还会导致农田地下水的污染[3]。张维理等[4]对我国北方14个县市的地下水硝酸盐含量调查结果显示,69个点中有半数以上硝酸盐含量超过最大允许量(50mg/L),其中最高者竟达300mg/L。

不同基因型玉米对N素吸收、利用的能力不同,不仅表现在不同品种对增施N肥的反应有显著差异,而且在植株体内N素的分配与利用也有明显差异,国内外这方面的研究已有不少报道[5~7]。在高投入地区,N高效玉米品种吸收较多的肥料N素,形成较高的产量;在低投入地区,N高效品种同样可以吸收较多的土壤矿质N素,从而形成较高的干物质和产量。另外,一些学者认为选择N高效玉米品种可以消耗更多的土壤硝态N,从而有效减少高温雨季硝态N的淋失,保护和改善环境。因此,选育N高效玉米基因型是降低N肥施用量、减少环境污染、增加粮食产量的重要途径之一,具有显著的经济、生态和社会效益。但是,N高效品种的选育需要耗费大量的时间与精力,如果在选择产量的同时

收稿日期:2001-07-20
基金项目:国家自然科学基金(39770438);国家重点基础发展规划项目(G1999011707)资助。
作者简介:刘建安(1972－),男,山东菏泽人,博士,主要从事植物营养遗传研究。

加上一些与产量密切相关的次级性状，则可以大大提高选择效率。在我国，人口和粮食的巨大压力使玉米育种的重点一直放在高产和抗病方面，对 N 营养高效种质资源的收集、筛选以及 N 高效遗传育种的工作做得很少。因此，本试验的主要目的是对我国北京地区玉米主要栽培杂交种的 N 效率状况作一比较，以确定施 N 水平对玉米杂交种在产量、N 累积量和 N 效率等方面的影响，探讨 N 效率构成性状对 N 效率的贡献，为玉米 N 高效品种在生产实践中的应用提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　供试材料

试验在中国农业大学昌平试验站进行。试验地为石灰性潮土，经多年机械化作业，地力较为一致。由于以前经常施用大量鸡粪，因而肥力较高，播种前 0～100cm 土壤剖面的矿质 N 为 51.75 kg/hm^2。土壤基础性状见表 1。试验用的 8 份玉米为我国北京地区主要的玉米杂交种，其育成单位见表 2。玉米杂交种于 1997 年 5 月 3 日播种，9 月 18 日收获。生育期间天气情况比较正常。

表 1　供试土壤基本性状

Table 1　Basic properties of tested soil

土层深度 Soil depth (cm)	有机质 OM (g/kg)	全 N Total N (g/kg)	速效磷 Avail. P (mg/kg)	速效钾 Avail. K (mg/kg)
0～20	14.53	0.77	24.11	247.12
20～40	12.05	0.71	13.60	193.06
40～60	8.06	0.64	2.20	200.27
60～80	4.89	0.43	4.22	218.29
80～100	2.81	0.28	3.82	155.22

表 2　供试玉米杂交种

Table 2　Maize hybrids tested

杂交种 Hybrid	育种单位 Breeding institute	杂交种 Hybrid	育种单位 Breeding institute
唐抗 5 号 TK5	河北唐山市农科所 Hebei	高光效 1 号 HP	中国农业大学 CAU
西玉 3 号 XY3	山东莱州西由玉米所 Shandong	农大 108 ND108	中国农业大学 CAU
农大 3315 ND3315	中国农业大学 CAU	中单 120 ZD120	中国农业科学院 CAAS
农大 60 ND60	中国农业大学 CAU	中单 2 号 ZD2	中国农业科学院 CAAS

1.2　试验设计

试验采取裂区设计，以不施 N (-N) 和施 N (+N)为主处理，供试玉米杂交种作为副处理，重复 3 次。播种前 2 个主处理均施 P_2O_5 90 kg/hm^2(重过磷酸钙，含 P_2O_5 46%)，其中施 N 处理另施 N 75 kg/hm^2(尿素)作基肥；在大喇叭口期，施 N 处理还追施 N 150 kg/hm^2(尿素)。每处理每品种 4 行，行长 5m，行距 0.5m，株距 0.33m，小区面积 10m^2。

1.3　测定项目与方法

播前用常规分析方法测定 0～100cm 土壤有机质、全 N、矿质 N、速效 P 和速效 K 含量。拔节期和吐丝期每小区取样 3 株，测定植株生物量、N 浓度。成熟期每小区取样 20 株，测定植株生物量和 N 浓度，考种记录子粒产量。样品分成茎、叶、穗 3 部分，70℃ 下烘干，粉碎。

N 浓度：凯氏定 N 法测定；

N 响应度：(高 N 水平下产量-低 N 水平下产量)/(高 N 施 N 量-低 N 施 N 量)；

N 效率及其构成因素：依照 Moll[6] 的理论计算 N 效率。

2　结果与分析

2.1　玉米杂交种的产量和 N 累积量

在同一施 N 水平下，不同玉米杂交种之间的产量存在显著的差异(表 3)。在不施 N 条件下，农大 108 的产量最高，耐低 N 能力最强，中单 2 号和中单 120 的产量只有农大 108 的一半左右，耐低 N 能力最弱，不同品种之间的变异幅度高达 62%；在施 N 条件下，除农大 3315 以外，其余品种的产量都呈增加趋势，不同品种之间的变异幅度为 57%。

对于 N 累积量来说，吐丝前、吐丝后、子粒 N 累积量和总 N 都存在显著的基因型差异。在不施 N 条件下，农大 108 的吐丝前 N 累积量、子粒 N 累积量和总 N 都最高，高光效 1 号的吐丝后 N 累积量最高，不同品种之间吐丝前、吐丝后、子粒 N 累积量和总 N 的变异幅度依次为 50%、133%、53% 和 55%；在施 N 条件下，农大 108、高光效 1 号和农大 60 的吐丝前 N 累积量、吐丝后 N 累积量、子粒 N 累积量和总 N 显著高于中单 120 和中单 2 号。不同品种之间吐丝前、吐丝后、子粒 N 累积量和总 N 的变异幅度依次为 24%、114%、52% 和 48%。

2.2　不同玉米杂交种的 N 响应度

从图 1 可以看出，N 响应度在不同玉米杂交种之间存在显著的差异。除农大 3315 外，其余品种的 N 响应度都大于零。其中，农大 60、高光效 1 号和唐抗 5 号的 N 响应度较高，每增加 1kg N 肥可增产 7kg 以上；西玉 3 号、中单 120 和中单 2 号的 N 响应度较低，每增加 1kg N 肥所增加的产量不足 3kg。

表3 玉米杂交种在2个施N水平下的产量和N累积量

Table 3 Grain yield and shoot N accumulation of maize hybrids at two soil N levels

施N量 N rate (kg/hm²)	杂交种 Hybrid	产量 Grain yield (kg/hm²)	N累积量 Shoot N accumulation (kg/hm²)			
			总量 Total	吐丝前 Before silking	吐丝后 After silking	子粒 Grain
0	唐抗5号 TK5	9060	229.79	161.82	67.97	138.70
	西玉3号 XY3	11582	258.71	184.32	74.38	165.21
	农大3315 ND3315	9083	207.02	153.61	53.41	133.69
	农大60 ND60	10250	265.79	155.20	110.59	160.83
	高光效1号 HP1	11415	288.83	150.00	138.83	178.03
	农大108 ND108	12635	323.03	210.33	112.70	179.24
	中单120 ZD120	6795	186.91	161.86	25.05	105.40
	中单2号 ZD2	6669	226.56	129.30	97.26	102.37
	平均值 Mean	9686	248.33	163.31	85.02	145.43
	$LSD_{(0.05)}$	1076	27.41	24.09	9.43	16.21
225	唐抗5号 TK5	10650	309.60	225.12	84.48	157.60
	西玉3号 XY3	11858	343.67	204.95	138.72	190.55
	农大3315 ND3315	8660	236.96	199.58	37.38	134.41
	农大60 ND60	12910	336.42	200.53	135.89	202.68
	高光效1号 HP1	13120	340.64	225.92	114.72	201.55
	农大108 ND108	13473	364.06	219.30	144.77	192.07
	中单120 ZD120	7370	218.74	176.49	42.25	117.56
	中单2号 ZD2	7330	253.34	197.80	55.54	122.17
	平均值 Mean	10671	300.43	206.21	94.22	164.82
	$LSD_{(0.05)}$	1076	27.41	24.09	9.43	16.21

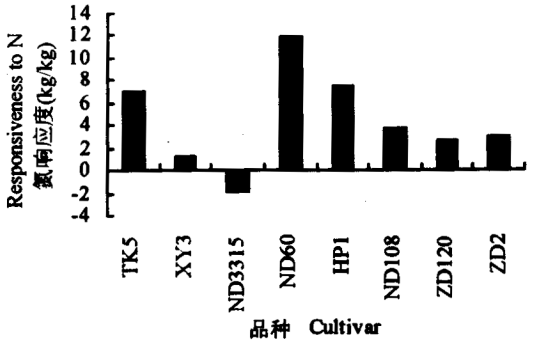

图1 玉米杂交种的N响应度

Fig. 1 N responsiveness of maize hybrids

2.3 玉米杂交种在两个施N水平下的N效率

不同玉米杂交种在2个施N水平下的吸收效率、利用效率和N效率如表4所示。可以看出，与不施N相比，施N条件下吸收效率、利用效率和N效率都呈下降趋势。其中吸收效率和N效率显著下降，而利用效率下降幅度不大。另外，在同一施N水平下，不同品种之间的吸收效率、利用效率和N效率都存在显著的差异。其中，农大108在两个施N水平下的吸收效率和N效率最高，西玉3号和农大3315在不施N条件下的利用效率显著高于其他品种，农大60和高光效1号在施N水平下的利用效率比较高，中单120和中单2号的吸收效率、利用效率和N效率最低。

2.4 N效率与其构成性状

N效率与其构成性状在2个施N水平下的分析结果如表5所示。从中可以看出，在不施N和施N水平下吸收效率对N效率的贡献分别为0.63、0.73，均大于利用效率的对应值，并且随施N量增加吸收效率的贡献有上升趋势。进一步从N效率与吸收效率、利用效率的通径分析（表6）看，施N条件下吸收效率和利用效率对N效率的直接作用都有所下降，间接作用呈上升趋势，但利用效率的直接作用下降的幅度明显大于吸收效率，说明施N条件下利用效率贡献下降的原因是其直接作用下降幅度显著高于吸收效率。利用效率可以分解为子粒产量/子粒含N量(G_w/N_g)和N收获指数(N_g/N_t)，随施N量增加，N收获指数对N效率的贡献急剧下降，而子粒产量/子粒含N量的贡献则基本保持不变。因此，N收获指数贡献的下降是造成利用效率贡献降低的主要原因。吐丝前吸N量占总N的比

值对 N 效率的贡献表现为负值，而吐丝后吸 N 量占总 N 的比值对 N 效率的贡献很大，说明随吐丝后吸 N 量的增加及其在子粒中所占比例的上升，N 效率逐渐提高。

表 4　玉米杂交种在 2 个施 N 水平下的 N 效率(kg/kg)

Table 4　N use efficiency of maize hybrids at two N levels

杂交种 Hybrid	吸收效率 Uptake efficiency		利用效率 Utilization efficiency		N 效率 Use efficiency	
	-N	+N	-N	+N	-N	+N
唐抗 5 号 TK5	4.44	1.12	39.43	34.40	175.07	38.48
西玉 3 号 XY3	5.00	1.24	44.77	34.50	223.81	42.85
农大 3315 ND3315	4.00	0.86	43.88	36.55	175.53	31.29
农大 60 ND60	5.14	1.22	38.56	38.37	198.07	46.65
高光效 1 号 HP1	5.58	1.23	39.52	38.52	220.58	47.41
农大 108 ND108	6.24	1.32	39.11	37.01	244.15	48.68
中单 120 ZD120	3.61	0.79	36.35	33.69	131.30	26.63
中单 2 号 ZD2	4.38	0.92	29.44	28.93	128.88	26.49
平均值 Mean	4.80	1.09	38.88	35.25	187.17	38.56
$LSD_{(0.05)}$	0.55	0.14	4.35	3.93	21.25	4.38

表 5　构成性状对 N 效率平方和的贡献

Table 5　Contribution of the component traits to the sum of squares of N use efficiency

构成性状 Component trait	表达式 Formula	$\log_{10}$	-N	+N
			$SXiY/SY^2$	
N 效率 N use efficiency	G_w/N_s	Y	–	–
吸收效率 Uptake efficiency	N_t/N_s	X_1	0.63	0.73
利用效率 Utilization efficiency	G_w/N_t	X_2	0.37	0.27
N 收获指数 N harvest index	N_g/N_t	X_3	0.28	0.16
子粒产量/子粒含 N 量 Grain yield / N content of grain	G_w/N_g	X_4	0.09	0.11
吐丝前吸 N 量/总 N N uptake before silking / Total N	N_b/N_t	X_5	-0.22	-0.49
吐丝后吸 N 量/总 N N uptake after silking / Total N	N_a/N_t	X_6	0.74	1.26
子粒含 N 量/吐丝后吸 N 量 N content of grain /N uptake after silking	N_g/N_a	X_7	-0.46	-1.10

G_w：子粒产量 grain yield；N_g：子粒含 N 量 N content of grain；N_s：施 N 量(包括播种时土壤矿质 N)N rate applied (included mineral N of soil before sowing)；N_t：植株地上部 N 吸收总量 total N uptake in shoot；N_b：吐丝前地上部 N 吸收量 N uptake in shoot before silking；N_a：吐丝后地上部 N 吸收量 N uptake in shoot after silking.

表 6　N 效率与其构成因素的通径分析

Table 6　Path analysis of N efficiency and its components

通径 Path	施 N 水平 N level	直接通径系数 Direct path coefficient	间接通径系数 Indirect path coefficient	相关系数 Correlation coefficient
N 吸收效率对 N 效率	-N	0.7922		0.8723**
N uptake efficiency to N use efficiency	+N	0.7746		0.9571**
通过 N 利用效率	-N		0.0801	
Through N utilization efficiency	+N		0.1824	
N 利用效率对 N 效率	-N	0.4939		0.6224
N utilization efficiency to N use efficiency	+N	0.3403		0.7556*
通过 N 吸收效率	-N		0.1285	
Through N uptake efficiency	+N		0.4153	

多元决定系数 Multi-decisive coefficient R^2：$R^2=0.9984$ (-N)，$R^2=0.9985$ (+N)

3 讨论

现代作物育种一般是在土壤养分充足的条件下进行的,因而所育出的高产玉米品种通常可以认为是高N水平下的N高效品种。如果减少施N量,这些N高效品种的表现如何还不十分清楚。因此,为了获得耐低N的玉米品种,在低N条件下进行选择是非常必要的[8]。Laffitte和Edmeades[8]发现在低N和高N条件下选择N高效品种并不存在负相关,说明耐低N和施N响应的选择可以在2个不同的施N水平下同时进行。本试验结果表明,不施N条件下不同玉米杂交种表现出显著的耐低N差异,农大108、西玉3号、高光效1号和农大60在低N水平下产量较高(表3),对低N的耐性较强,其中农大60和高光效1号的N响应度较高(图1),对增施N肥反应强烈,生产上可以施用较多N肥,以期在高N条件下获得高产。农大108和西玉3号的N响应度较低,对增施N肥反应迟钝,生产上不应施用大量的N肥,以免浪费。中单120和中单2号在不施N条件下的产量最低,N响应度也不高,说明这类品种的耐低N能力和对增施N肥的响应都比较弱,生产上应少施N肥。

从不同生育时期N累积量(表3)来看,吐丝前、吐丝后、子粒含N量和总N都存在显著的基因型差异,这与Moll[6]的研究结果一致,Pollmer[5]的田间试验和Friedrich[9]的溶液培养试验也证明不同玉米品种吐丝后N累积量存在显著的基因型差异,特别是在施N量较高的条件下,说明选育吐丝后保持较高N累积量的品种可能是非常有利的。本试验结果同样表明,不施N条件下吐丝后N累积量与产量呈正相关,施N条件下呈极显著正相关($r=0.93^{**}$)。吐丝后N累积量对产量基因型差异的重要性或许可以用库源关系和吐丝前N累积量来解释。吐丝期生物量可以粗略地作为生殖生长期光合作用的源,产量则可以作为生殖生长的库,由于吐丝后吸收的N素和光合作用形成的碳水化合物主要是用于形成子粒,子粒含N量则可以作为生殖生长的N库。一般说来,吐丝后N累积量较少的品种产量较低,子粒含N量也不高,如中单120。这是由于产量(库容)低而反馈抑制了吐丝后植株从土壤中吸收N素的能力,造成植株体内N浓度较高,从而抑制了硝态N或铵态N的吸收。因此,吐丝后N累积量与子粒含N量的相关系数(不施N为0.67;施N为0.94)显著高于它与吐丝前N累积量的相关系数(不施N为0.03;施N为0.54)。Dhugga和Waines[10]的小麦试验结果说明了同样的问题。在本试验中,农大60在施N条件下得到了较高产量,而中单120在不施N条件下与施N条件产量相差不多。中单120和中单2号达到最大产量所需要的吐丝后N累积量最少,对生育后期的缺N胁迫抗性较强。也有人认为早熟品种的产量受生育后期缺N胁迫的影响较小,如中单120和中单2号,这些品种在土壤N素缺乏的情况下比较有利,而农大60在施N量较高的情况下则比较有利。

对于高光效1号和中单2号来说,在土壤N素缺乏的情况下,吐丝前植株从土壤中吸收N素的潜力没有得到充分发挥。而当土壤中含有足够的N素时,吐丝前植株从土壤中吸收了大量的N素,从营养体转移到子粒中的N素相应增加,因此吐丝后植株从土壤中直接吸收的N素占总N的比例下降,吐丝后N累积量对产量和N效率的影响相对减弱(表3)。

N效率是由吸收效率和利用效率组成的。Moll[6]在2个施N水平下研究了8个玉米杂交种的产量、N累积量和N效率的情况,发现低N条件下利用效率是N效率变异的主要来源,而高N条件下吸收效率则起决定作用。Dhugga和Waines[10]在3个施N水平下研究了14个小麦品种的N效率与其组成性状的关系,发现任何一个施N水平下吸收效率都是N效率变异的主要来源,尽管随施N量的增加吸收效率的贡献有所下降。Ortiz-Monasterio[11]认为低N下N效率的变异主要来源于吸收效率,而在高N水平下利用效率则起主要作用。本试验结果(表6)表明,吸收效率和利用效率对N效率既有直接作用,也有间接作用。与不施N相比,施N条件下吸收效率、利用效率的直接作用都有所下降,间接作用呈上升趋势,其中利用效率直接作用的下降幅度较大。吸收效率在不施N和施N条件下均是N效率基因型差异的主要来源。由此可以看出,吸收效率和利用效率对N效率基因型差异的相对重要性随作物种类、基因型和环境条件的变化而改变,其中施N水平的影响最大。

参考文献:

[1] Sherrard J H, Lambert R J, Below F E *et al*. Use of physiological traits, especially those of nitrogen metabolism for selection in maize [A]. *In*: Beyra C A (eds.). Biochemical Basis of Plant Breeding, Vol. 2, Nitrogen Metabolism[C]. CRC Press. Boca Raton. FL, 1986. 109-130.

[2] 张福锁,米国华,刘建安.玉米 N 效率遗传改良与应用[J]. 农业生物技术学报,1997,2:112-117.

[3] Schepers J S, Below F E. Influence of corn hybrids on nitrogen uptake and utilization efficiency[A]. *In*: Wilkinson D (ed.). Proceedings of Forty - Second Annual Corn and Sorghum [C] Res. Conf. No. 42. American Seed Trade Assoc.,1987. 172-186.

[4] 张维理,田哲旭,张 宁,李晓齐. 我国北方农用 N 肥造成地下水硝酸盐污染的调查[J]. 植物营养与肥料学报,1995,1(2):80-87.

[5] Pollmer W G, Eberhard D, Klein D and Dhillon B S. Studies on maize hybrids involving inbrid lines with varying protein content [J]. Z. Pflanzenzuecht, 1978,80:142-148.

[6] Moll R H, Kamprath E J and Jackson W A. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization [J]. Agron. J. , 1982,74:562-564.

[7] Tsai C Y, Huber D M, Glover D V and Warren H L. Relationship of N deposition to grain yield and N response of three maize hybrids [J]. Crop Sci. , 1984, 24:277-281.

[8] Lafitte H R and Edmeades G O. Improvement for tolerance to low soil nitrogen in tropical maize. Ⅰ. Selection criteria[J]. Field Crop Res., 1994a,39:1-14.

[9] Friedrich J W, Schrader L E and Nordheim E V. N deprivation in maize during grain filling. I. Accumulation of dry matter, nitrate-N, and sulfate-S[J]. Agron. J., 1979,71:461-465.

[10] Dhugga K S and Waines J G. Analysis of nitrogen accumulation and use in bread durum wheat[J]. Crop Sci., 1989,29:1232-1239.

[11] Ortiz-Monasterio R, J.I., K.D. Sayre, S. Rajaram, and M. McMahon. Genetic progress in wheat yield and nitrogen use efficiency under four nitrogen rates[J]. Crop Sci., 1997, 37:898-904