



论文

中国东华北部分地区玉米主推品种高产氮高效潜力分析

陈范骏^①, 房增国^②, 高强^③, 叶优良^④, 贾良良^⑤, 袁力行^①, 米国华^{①*}, 张福锁^①

① 中国农业大学资源环境与粮食安全研究中心, 教育部植物-土壤相互作用重点实验室, 北京 100193;

② 青岛农业大学资源与环境学院, 青岛 266109;

③ 吉林农业大学资源与环境学院, 长春 130118;

④ 河南农业大学资源与环境学院, 郑州 450002;

⑤ 河北省农林科学院农业资源环境研究所, 石家庄 050051

* 联系人, E-mail: miguohua@cau.edu.cn

收稿日期: 2012-07-10; 接受日期: 2013-01-13

国家重点基础研究发展计划(批准号: 2011CB100305 和 2009CB11860)、国家自然科学基金(批准号: 31121062 和 31172015)和农业部公益性行业科研专项经费(批准号: 201103003)资助项目

摘要 选育高产与养分高效的粮食品种(高产高效品种)是解决中国粮食安全和资源、环境问题的重要途径之一, 但是利用氮高效品种实现玉米节氮增产的潜力并不清楚. 本研究对中国东华北主栽玉米品种在 8 个环境下进行了产量及氮效率评价, 以期为玉米高产氮高效育种提供依据. 结果表明, 在适宜的低氮胁迫下(减产幅度为 25%~60%), 玉米产量的基因型×氮互作效应显著, 能够筛选到不同类型的氮效率品种. 目前东华北玉米主推品种中, 在高产栽培条件下, 高产氮高效品种(包括双高效型和高氮高效型两种类型)的增产幅度为 8%~10%, 节氮潜力达到 16%~21%. 在低氮胁迫下, 耐低氮品种具有增产 12% 的潜力. 选育高产氮高效玉米品种是实现增产节氮的可行途径.

关键词

玉米
氮效率
高产氮高效

粮食安全始终是关系中国国民经济发展、社会稳定和国家自立的全局性重大战略问题. 2011 年, 联合国世界粮食计划署与英国著名风险分析公司 Maplecroft 将中国列为粮食安全“中度风险”国家^[1]. 目前, 中国粮食需求呈刚性增长, 而耕地数量逐年减少, 因而提高平均单产是关键措施之一. 《国家粮食安全中长期规划纲要(2008-2020)》中提出, 2020 年全国粮食单产水平需提高到 350 kg 左右^[2]. 另一方面, 高产品种对化肥的依赖程度加大致使中国化肥用量

逐年增加, 每年已接近 5000 万吨. 过量施用化肥和肥料利用效率低下, 使大量养分流失到了环境中, 造成大量的环境问题^[3]. 如何在高投入集约化生产条件下, 提高养分利用效率、减少养分损失及其带来的环境问题, 是当前作物生产中面临的重要课题^[4,5].

玉米在未来中国粮食增产中起着举足轻重的作用, 然而玉米氮肥利用效率较低是一个不争的事实. 张福锁等人^[6]研究表明, 20 世纪 90 年代中国玉米的平均氮效率(NUE)只有 34 kg/kg. 在李潮海等人^[7]、李

引用格式: 陈范骏, 房增国, 高强, 等. 中国东华北部分地区玉米主推品种高产氮高效潜力分析. 中国科学: 生命科学, 2013, 43: 342-350

英文版见: Chen F J, Fang Z G, Gao Q, et al. Evaluation of the yield and nitrogen use efficiency of the dominant maize hybrids grown in North and Northeast China. Sci China Life Sci, in press, doi: 10.1007/s11427-013-4462-8

登海等人^[8]、陈国平等人^[9]的吨粮田试验中, 虽然平均单产达到 14613 kg/ha, 但平均施氮量高达 434 kg/ha, 因此 NUE 也只有 34 kg/kg. Chen 等人^[10]总结了 43 个高产纪录, 产量平均为 1.52×10^3 kg/ha, 氮肥施用高达 747 kg/ha, NUE 只有 21 kg/kg. 根据 1995 年的联合国粮农组织(FAO)统计数据^[11], 中国玉米实际单产水平为 4946 kg/ha, 施氮量为 130 kg/ha, 中国 NUE 为 38 kg/kg, 而世界玉米平均单产为 4589 kg/ha, 平均施氮量为 92 kg/ha, NUE 为 57 kg/kg; 其中美国单产为 8398 kg/ha, 施氮量为 150 kg/ha, NUE 达到 56 kg/kg. 由此可见, 中国玉米生产中单产、NUE 离发达国家还有较大差距和提升空间, 而氮高效品种将在兼顾高产氮高效两个目标中发挥重要作用.

研究表明, 玉米对氮肥利用存在基因型差异^[6,12-14], 这为通过遗传改良提高 NUE 提供了可能. 作物养分高效品种的遗传改良工作已经受到国内外研究机构和育种公司的高度重视. 国际玉米小麦改良中心(CIMMYT)率先开展了玉米耐低氮研究^[15], 随后美国杜邦先锋等知名跨国育种公司都投入了大量资金进行相关研发工作^[16]. 中国农业大学通过多年工作选育的氮高效杂交种中农 99, 在施氮条件下比对照农大 108 增产 10.5%, 不施氮条件下增产 14%^[17]. 这表明, 氮高效的遗传改良具有可行性. NUE 遗传改良的真正目标是进一步提高单位氮肥投入下的作物产量, 这包括以下 3 方面的含义: 一是在现有氮肥投入水平不变的前提下, 高于供试品种的平均产量, 实质上提高产量潜力; 二是保持现有产量水平前提下, 降低氮肥的投入, 实质上提高节氮潜力; 三是在极度低氮条件下, 提高作物的绝对产量, 也就是“耐低氮”^[18]. 在非洲, 由于农业生产中的化肥投入极低,

育种目标往往以发展耐低氮的中产型品种为主^[19]. 相比之下, 由于粮食安全和资源环境安全的双重压力, 中国对玉米品种的要求是既能提高单产同时又能降低氮肥投入的“高产氮高效”品种.

刘建安等人^[20]将不同 NUE 品种划分为 4 种类型, 双高效型(在高氮和低氮下产量都高, efficient-efficient, EE)、耐低氮型(即在低氮下高产, LN-efficient, LNE)、高氮高效型(即在高氮下高产, HN-efficient, HNE)、双低高效型(即在高氮和低氮下产量都低, nonefficient-nonefficient, NN). 那么中国当前玉米品种 NUE 如何? 氮高效品种在节氮增效上有多大潜力? 这是进一步加强玉米氮高效育种工作的重要依据. 本研究基于以上问题, 综合了 2008~2009 年期间在中国东华北玉米主产区进行的 8 个 NUE 筛选试验, 以期揭示在这些区域不同 NUE 品种的增产节氮潜力, 为氮高效育种目标的确定奠定基础.

1 材料与方法

1.1 试验地点及气候、土壤条件

选择东华北各地区主栽玉米品种 10~15 个(表 1), 分别于 2008~2009 年在北京中国农业大学昌平试验站、吉林长春、山东青岛、河南许昌县和河北衡水县共计 8 个环境(表 2)进行了 NUE 比较试验. 其中在吉林长春、山东青岛即墨县和北京昌平中国农业大学试验站进行了 2 年定点试验. 吉林长春和北京昌平试验点为春播玉米, 生育期在 5 月初到 9 月底; 河南许昌、河北衡水和山东青岛都为夏播玉米, 生育期在 6 月上中旬到 10 月上旬. 各个试验点的播前土壤理化性状见表 2, 其中北京点试验在中国农业大学昌平实验站氮磷长期定位田中进行, 此定位试验始于 1984 年,

表 1 各试验点参试品种名称

实验地点	品种名称
河南许昌	郑单 958, 先玉 335, 浚单 20, 先锋 32D22, 蠡玉 13, 农大 108, 浚单 18, 豫禾 988, 滑玉 14, 豫丰 335, 新单 29, 中科 11, 洛玉 4 号, 漯单 9 号
河北衡水	郑单 958, 先玉 335, 浚单 20, 先锋 32D22, 蠡玉 13, 农大 108, 金海 5, 秀青 73-1, 蠡玉 16, 鲁单 981, 蠡玉 18, 鲁单 9002, 衡 6272, 衡 311
吉林长春	郑单 958, 先玉 335, 浚单 20, 先锋 32D22, 蠡玉 13, 吉单 137, 宁玉 309, 农大 588, 平全 13, 双玉 103, 德丰 77, 先玉 508, 益丰 29, 郁青 281, 吉东 26
北京昌平	郑单 958, 先玉 335, 浚单 20, 先锋 32D22, 蠡玉 13, 农大 108, 金海 5, 秀青 73-1, 蠡玉 16, 超试 1 号
山东青岛	郑单 958, 先玉 335, 浚单 20, 先锋 32D22, 蠡玉 13, 农大 108, 金海 5, 鲁单 981, 鲁单 9032, 聊玉 22, 蠡玉 35, 莱农 14, 鑫丰 1 号, 振杰 3 号

利用了其中不施氮、施氮小区^[21]。

1.2 试验设置

试验采用裂区设计, 以品种作为主处理, 施氮量作为副处理。重复3次, 小区面积12~20 m², 行长6 m, 行距0.5~0.6 m, 株距0.28~0.33 m, 密度为60000株/ha。氮肥分为低氮(LN, 0 kg/ha N)、中氮(MN, 120 kg/ha N)与高氮(HN, 240 kg/ha N)处理, 施用尿素, 基肥、追肥(大喇叭口期)各一半。基肥施磷量为60~90 kg/ha P₂O₅, 施钾量为30~45 kg/ha K₂O, 施用过磷酸钙和硫酸钾。

1.3 统计分析

利用供试品种在低氮和高氮下的NUE平均值作为分界线, 将NUE划分为如下4种类型: (i) EE型, 此类基因型在低氮和高氮水平下的NUE均高于供试基因型的平均值; (ii) LNE型, 此类基因型在低氮水平下的NUE高于供试基因型的平均值, 而高氮水平下则低于供试基因型的平均值; (iii) HNE型, 此类基因型在低氮水平下的NUE低于供试基因型的平均值, 而高氮水平下则高于供试基因型的平均值; (iv) NN, 此类基因型在低氮、高氮水平下的NUE均低于供试基因型的平均值。

根据陈范骏^[22]方法估算高效品种的节氮潜力, 即某个品种的产量达到正常供氮条件下所有供试品种平均产量时, 该品种所节约的氮肥用量占本试验施氮量的百分比。估算公式为:

氮肥农学效率(AE)=(产量-空白产量)/施氮量, (1)

特定品种的节氮量=施氮量-(供试所有品种平均产量-特定品种的空白产量)/特定品种的AE, (2)

特定品种的节氮潜力(%)=特定品种的节氮量/施氮量×100, (3)

增产潜力百分比(%)=(特定品种产量-供试品种平均产量)/供试品种平均产量×100, (4)

氮效率(NUE)=产量/施氮量^[13]。 (5)

LN或MN下的减产幅度(%)=(HN下产量-LN或MN下产量)/HN下产量×100。 (6)

统计分析采用SAS软件, 按双因素试验的分析程序进行统计分析。遗传力(h^2)估算采用Hallauer和Miranda^[23]的计算方法:

$$h^2\% = \frac{\sigma_g^2}{\sigma_g^2 + \sigma_e^2 / r} \times 100\%, \quad (7)$$

其中, σ_g^2 为遗传方差, σ_e^2 为随机误差, r 为重复。遗传相关和表型相关计算方法如下公式^[24]:

$$r_p(xixj) = COV_p(xixj) / \sqrt{\delta_p^2(xi)\delta_p^2(xj)}, \quad (8)$$

$$r_g(xixj) = COV_g(xixj) / \sqrt{\delta_g^2(xi)\delta_g^2(xj)}. \quad (9)$$

2 结果与分析

2.1 不同环境条件下两个氮水平的产量方差分析

方差分析表明, 1~4号试验点不存在氮处理和基因型的互作, 其中2号试验点氮肥处理没有效应, 5~8号试验点既存在氮肥效应, 同时存在氮与基因型的互作(表3)。

8个试验中, 玉米产量的遗传力平均为75.8%, 氮水平对其没有影响(表4)。氮处理和基因型的互作效应不显著的试验中, 除试验4中LN与HN产量的表型相关未达到显著外, 其他各处理间的产量都存在显著的表型相关和遗传相关。氮与基因型的互作效应显著的试验中, LN与HN的产量间无显著表型相关, 除5号试验外, 氮水平间的产量遗传相关也不显著; 同时LN与MN产量间也有相同趋势; 而MN和HN产量之间, 除7号试验无显著表型相关外, 其他试验都存在显著表型和遗传相关。

2.2 不同环境条件下氮水平之间的产量变异及其减产幅度

根据方差分析结果, 将不同环境下的试验分为两类, 一类是不存在氮处理和基因型互作的试验, 包括试验1~4。另一类是存在氮处理和基因型互作的试验, 包括试验5~8(表5)。第一类试验中HN与LN平均产量相差只有847 kg/ha, 平均减产幅度只达到了8.82%, 其中LN下, 相对于HN减产幅度最大的是河南许昌点, 减产幅度达到了13.4%, 最小是河北衡水, 只减产1.68%。3个处理间产量的平均变异系数没有显著差异, 且变化幅度较小, 只有7.98%~8.74%。MN与HN产量无显著差异, 而其NUE从38.2 kg/kg提到到75.9 kg/kg。

在第二类试验中HN与LN平均产量相差较大, 达到3788 kg/ha, 减产幅度达到39.0%, 充分显现出不同基因型对氮的响应差异, 其中减产幅度最大试验点为山东青岛, 两年平均减产达49.3%, 其他两个点

表 2 不同年度不同试验地点的经纬度、降雨量以及土壤理化性状

试验编号	年度	地点	经纬度	生育期间降雨量(mm)	土壤类型	速效氮(mg/kg)		速效磷(mg/kg)		速效钾(mg/kg)		有机质(g/kg)		pH	
						HN	LN	HN	LN	HN	LN	HN	LN	HN	LN
1	2008	河南许昌	34°07', 113°77'	397	潮土	5.23		10.7		80.0		15.4		7.90	
2		河北衡水	37°45', 115°30'	400	潮土	15.6		33.7		106.4		14.5		8.45	
3		吉林长春	43°78', 125°38'	502	黑土	5.9		31.8		110.1		22.5		6.67	
4		北京昌平	40°09', 116°36'	520	潮土	20.0	5.64	16.9	22.4	139	115	12.9	12.6	8.27	8.20
5		山东青岛	36°38', 120°45'	501	棕壤	20.2		42.9		94		13.0		5.69	
6	2009	山东青岛	36°38', 120°45'	416	棕壤										
7		吉林长春	43°78', 125°38'	367	黑土										
8		北京昌平	40°09', 116°36'	360	潮土										

表 3 不同试验点的玉米产量方差分析^{a)}

试验	区组	氮处理	基因型	氮处理×基因型	误差
1	1191934	14369263***	4281028***	814321	533120
2	2450277***	417789	4278164***	341711	288733
3	118756	17421263***	3340509***	354562	681735
4	568841	13517231***	4490705***	686626	526279
5	848851***	176654000***	5128346***	1008196*	617205
6	2003330*	2003330***	3380001***	1754041***	395034
7	416202	137214683***	3179078***	3057113***	692245
8	652956	90530388***	3832923***	2114208***	357040

a) *, **和***分别表示 $P=0.01, 0.05$ 和 0.001 水平的显著性差异表 4 不同氮水平下玉米产量的遗传力及其相关性^{a)}

试验编号	LN	MN	HN	LN-MN		LN-HN		MN-HN	
	h^2	h^2	h^2	r_P	r_G	r_P	r_G	r_P	r_G
1	72.4	64.7	85.1	0.567*	0.801**	0.664**	0.843**	0.558*	0.68**
2	81.5	86.0	82.6	0.775**	0.95***	0.779**	0.893***	0.884***	0.974***
3	37.1	63.6	50.7	0.812***	1.07***	0.683**	1.06***	0.721**	1.02***
4	56.9	84.2	69.1	0.615	0.891***	0.757*	1.020***	0.721*	0.979***
5	87.2	62.0	82.7	0.553*	0.814**	0.489	0.573*	0.724**	1.05***
6	86.2	87.7	77.3	0.041	0.0302	-0.175	-0.240	0.796**	1.08***
7	81.4	74.4	86.2	0.163	0.196	-0.309	0.160	0.365	1.01***
8	96.3	80.6	83.8	0.161	0.184	-0.185	-0.254	0.683*	0.731**

a) h^2 : 遗传力, r_P : 两处理间的表型相关, r_G : 两处理间的遗传相关

的减产幅度也在 30% 左右。同时这类试验中低氮条件下的产量变异系数显著高于高氮条件下变异系数, 因此能够显现出对氮响应不同类型基因型的特征。MN 与 HN 产量无显著差异, 而其 NUE 从 40.1 kg/kg 提到 78.0 kg/kg。

2.3 不同环境条件下对氮响应的不同反应类型的划分及其节氮增产潜力

对存在氮×基因型互作的试验, 分别以 LN 和 HN 处理下的平均产量作为划分标准, 对玉米品种进行

NUE 分类, 并计算平均产量、减产幅度%、NUE、节氮量、节氮潜力和增产幅度, 结果见表 6~9。LNE 型品种共有 15 个(表 6), 占总品种数量的 28%。在 LN 胁迫条件下, 这类品种比参试品种平均产量高 11.8%, 减产幅度为 26.3%。而在 MN 和 HN 条件下, 比参试品种平均产量低 3.25%~7.76%, 没有节氮效果。这类品种表现不稳定, 只有浚单 20、农大 108 在两个点上表现较为一致。

HNE 型品种共有 10 个(表 7), 占总品种数量的 19%。LN 胁迫条件下, 这类品种比参试品种平均产量

低 15.4%，减产幅度达到 52.6%。在 HN 条件下，比参试品种平均产量高 9.46%，节氮潜力达到 20.7%。其中先玉 335 在在 4 个点上表现一致，是典型的 HNE 品种。

EE 型品种共有 13 个(表8)，占总品种数量的 25%。LN 胁迫条件下，这类品种比参试品种平均产量高 15.0%，减产幅度达到 34.7%。而在 MN 和 HN 条件下，比参试品种平均产量高 6.62%~7.57%，节氮潜力达到 15.2%~15.9%。其中郑单 958 在 3 个点上表现一致，是典型的 EE 品种。

NN 品种共有 15 个(表9)，占总品种数量的 28%。LN 胁迫条件下，这类品种比参试品种平均产量低 13.5%，减产幅度达到 44.6%。而在 MN 和 HN 条件下，比参试品种平均产量低 4.26%~4.74%，没有节氮效果。

将 4 种 NUE 类型品种的产量平均值汇总(图 1)，可以看出，EE 型与 HNE 型品种的产量在 MN 和 HN 条件下无差异，在低氮下存在显著差异，即 HNE 型对低氮反应更为敏感。EE 代表性品种为郑单 958，HNE 代表性品种为先玉 335。而 LNE 型品种的产量在低氮下显著高于双低效品种，二者在 MN 和 HN 条件下没有差异，这类代表性品种为农大 108 和浚单 20。

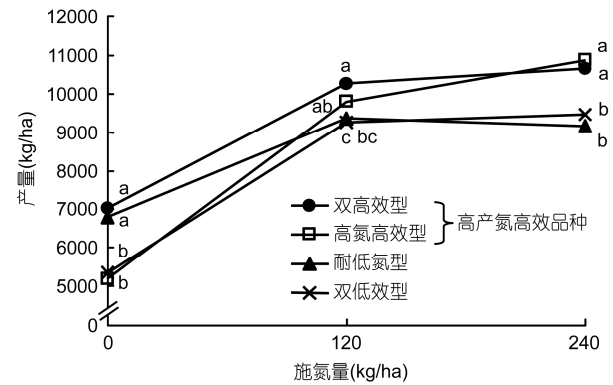


图 1 不同 NUE 类型玉米产量对氮肥的响应. 数据来自表 6~9 中各试验点数据的汇总

另外 4 个试验点都有的品种——蠡玉 13，由于存在与环境间的互作，其氮效率类型并不明确。

3 讨论

3.1 氮肥×基因型的互作及 NUE 选择压力

Bänziger 等人^[19]认为，一个高效的选择体系应具有 3 个特征，一是具备适当的遗传变异种质资源和选择压力；二是具有高效的实验体系，保证目标性状

表 5 不同试验点不同氮水平下的产量变化^{a)}

试验	LN				MN					HN			
	产量 (kg/ha)	变异度 (%)	减产幅度 (%)	LSD _{0.05}	产量 (kg/ha)	变异度 (%)	减产幅度 (%)	NUE (kg/kg)	LSD _{0.05}	产量 (kg/ha)	变异度 (%)	NUE (kg/kg)	LSD _{0.05}
不存在氮×基因型互作的试验													
1	7260	10.1	13.4	1354	8101	9.18	3.38	67.5	1281	8384	11.2	34.9	1064
2	8260	8.90	1.68	916	8453	10.0	-0.61	70.4	1186	8402	7.45	35.0	780
3	9181	7.04	11.7	1479	10034	6.77	3.45	83.6	1205	10393	6.61	43.3	1392
4	9752	5.90	8.55	1239	11061	9.02	-3.73	81.9	1170	10663	7.43	39.5	1299
平均	8613	7.98	8.82		9412	8.74	0.62	75.9		9460	8.17	38.2	
SE	546	0.94	2.58		692	0.69	1.73	4.04		619	1.03	2.01	
存在氮×基因型互作的试验													
5	4906	19.0	42.5	1395	8371	9.31	1.96	69.8	1628	8538	11.2	35.6	1469
6	4198	20.0	56.1	1053	8924	10.7	6.61	74.4	1109	9556	8.63	39.8	1139
7	8198	14.4	27.0	1717	11212	6.59	0.18	93.4	1162	11233	9.62	46.8	1193
8	7200	13.3	30.3	661	10076	9.08	2.43	74.6	1187	10327	9.35	38.2	1161
平均	6126	16.7**	39.0		9646	8.92	2.80	78.0		9914	9.70	40.1	
SE	942	1.66	6.60		631	0.86	1.36	5.25		572	0.54	2.40	

a) NS: 高氮和低氮间差异不显著; *和**分别表示高氮和低氮间在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平的差异显著性

表 6 LNE 型玉米品种的产量及氮肥利用特征

氮处理	品种名称	试验 5 浚单 20、聊玉 22、 莱农 14	试验 6 农大 108、鲁单 9032、鲁单 981、 振杰 3 号	试验 7 农大 588、吉东 26、 浚单 20、 益丰 29、郁青 281	试验 8 蠡玉 13、DH3719、 农大 108	平均	SE
LN	平均产量(kg/ha)	5662	4881	8858	7731	6783	917
	减产幅度(%)	27.6	46.2	15.2	16.3	26.3	7.20
	比整体平均产量增产量(kg/ha)	756	683	660	531	657	46.8
	比整体平均产量增产百分比(%)	15.4	16.3	8.06	7.38	11.8	2.35
MN	平均产量(kg/ha)	8081	8647	11076	9548	9338	653
	减产幅度(%)	-3.27	4.67	-6.05	-3.42	-2.02	2.32
	平均 NUE(kg/kg)	67.3	72.1	92.3	79.6	77.8	5.44
	节氮潜力(kg/ha)	-10.9	-7.47	-5.67	-30.3	-13.6	5.69
	节氮潜力百分比 r%	-9.12	-6.22	-4.72	-22.5	-10.6	4.05
	比整体平均产量增产量(kg/ha)	-290	-277	-136	-528	-308	81.2
	比整体平均产量增产百分比(%)	-3.46	-3.10	-1.21	-5.24	-3.25	0.83
HN	平均产量(kg/ha)	7825	9071	10444	9233	9143	536
	平均 NUE(kg/kg)	32.6	37.8	43.5	34.2	37.0	2.42
	节氮潜力(kg/ha)	-58.6	-23.9	-84.3	-145	-78.0	25.6
	节氮潜力百分比(%)	-24.4	-9.95	-35.1	-53.8	-30.8	9.24
	比整体平均产量增产量(kg/ha)	-713	-485	-789	-1094	-770	126
	比整体平均产量增产百分比(%)	-8.35	-5.07	-7.02	-10.6	-7.76	1.16

表 7 HNE 型玉米品种的产量及氮肥利用特征

氮处理	品种名称	试验 5 鲁单 9032、 先玉 335	试验 6 蠡玉 13、先锋 32D22、先玉 335	试验 7 德丰 77、先玉 335、 先玉 508	试验 8 先玉 335、金海 5	平均	SE
LN	平均产量(kg/ha)	4550	3183	6737	6309	5195	821
	减产幅度(%)	50.8	69.5	46.3	43.9	52.6	5.79
	比整体平均产量增产量(kg/ha)	-356	-1015	-1461	-891	-931	227
	比整体平均产量增产百分比(%)	-7.25	-24.2	-17.8	-12.4	-15.4	3.63
MN	平均产量(kg/ha)	8143	9449.6	11085	10475	9788	644
	减产幅度(%)	11.9	9.32	11.6	6.88	9.92	1.16
	平均 NUE(kg/kg)	67.9	78.7	92.4	77.6	79.1	5.04
	节氮潜力 (kg/ha)	-8.45	12.0	-5.26	16.5	3.69	6.19
	节氮潜力百分比 r%	-7.04	10.0	-4.39	12.2	2.69	4.90
	比整体平均产量增产量(kg/ha)	-228	526	-127	399	143	188
	比整体平均产量增产百分比(%)	-2.72	5.89	-1.13	3.96	1.50	2.04
HN	平均产量(kg/ha)	9243	10421	12537	11249	10863	694
	平均 NUE(kg/kg)	38.5	43.4	52.2	41.7	44.0	2.94
	节氮潜力(kg/ha)	39.0	33.4	72.1	61.5	51.5	9.18
	节氮潜力百分比(%)	16.3	13.9	30.1	22.8	20.7	3.63
	比整体平均产量增产量(kg/ha)	705	865	1304	922	949	127
	比整体平均产量增产百分比(%)	8.25	9.05	11.6	8.93	9.46	0.74

表 8 EE 型玉米品种的产量及氮肥利用特征

氮处理		试验 5	试验 6	试验 7	试验 8	平均	SE
	品种名称	郑单 958、蠡玉 13、浚单 20、郑单 958、 蠡玉 35	蠡玉 35、齐单 1 号	平全 13、 吉单 137、 32D22	32D22、秀青 73-1、 郑单 958		
LN	平均产量(kg/ha)	6007	4742	9266	8038	7013	1012
	减产幅度(%)	39.4	52.6	21.2	25.7	34.7	7.12
	比整体平均产量增产量(kg/ha)	1101	544	1068	838	888	129
	比整体平均产量增产百分比(%)	22.4	13.0	13.0	11.6	15.0	2.50
MN	平均产量(kg/ha)	9287	9443	11749	10572	10263	572
	减产幅度(%)	6.32	5.67	0.03	2.32	3.59	1.47
	平均 NUE(kg/kg)	77.4	78.7	97.9	78.3	83.1	4.95
	节氮潜力(kg/ha)	25.1	11.9	18.2	19.8	18.7	2.72
	节氮潜力百分比(%)	20.9	9.89	15.1	14.7	15.2	2.25
	比整体平均产量增产量(kg/ha)	916	519	537	496	617	100
	比整体平均产量增产百分比(%)	10.9	5.81	4.79	4.92	6.62	1.46
HN	平均产量(kg/ha)	9913	10011	11752	10823	10625	428
	平均 NUE(kg/kg)	41.3	41.7	49.0	40.1	43.0	2.01
	节氮潜力(kg/ha)	65.9	18.8	35.1	37.0	39.2	9.80
	节氮潜力百分比(%)	27.5	7.82	14.6	13.7	15.9	4.14
	比整体平均产量增产量(kg/ha)	1375	455	519	496	711	222
	比整体平均产量增产百分比(%)	16.1	4.76	4.62	4.80	7.57	2.85

表 9 NN 型玉米品种的产量及氮肥利用特征

氮处理		试验 5	试验 6	试验 7	试验 8	平均	SE
	品种名称	鑫丰 1 号、振杰 3 号、 金海 5 号、先锋 32D22、 农大 108、鲁单 981	金海 5、 莱农 14、聊玉 22	郑单 958、双玉 103、 宁玉 309、蠡玉 13	浚单 20、 蠡玉 16		
LN	平均产量(kg/ha)	4096	3578	7666	6039	5345	938
	减产幅度(%)	48.6	59.0	29.3	41.4	44.6	6.24
	比整体平均产量增产量(kg/ha)	-810	-620	-532	-1161	-781	140
	比整体平均产量增产百分比(%)	-16.5	-14.8	-6.48	-16.1	-13.5	2.36
MN	平均产量(kg/ha)	8135	8076	11074	9725	9253	717
	减产幅度(%)	-2.03	7.48	-2.07	5.59	2.24	2.51
	平均 NUE(kg/kg)	121	112	120	122	119	2.28
	节氮潜力(kg/ha)	-8.77	-26.2	-5.75	-18.8	-14.9	4.70
	节氮潜力百分比%	-7.31	-21.9	-4.79	-13.9	-12.0	3.82
	比整体平均产量增产量(kg/ha)	-236	-848	-138	-351	-393	158
	比整体平均产量增产百分比(%)	-2.82	-9.50	-1.23	-3.49	-4.26	1.81
HN	平均产量(kg/ha)	7973	8729	10850	10300	9463	670
	平均 NUE(kg/kg)	33.2	36.4	45.2	38.1	38.2	2.54
	节氮潜力(kg/ha)	-44.2	-43.8	-34.7	-2.36	-31.3	9.88
	节氮潜力百分比(%)	-18.4	-18.2	-14.5	-0.87	-13.0	4.14
	比整体平均产量增产量(kg/ha)	-565	-827	-383	-27.1	-451	168
	比整体平均产量增产百分比(%)	-6.62	-8.65	-3.41	-0.26	-4.74	1.84

具有较好的遗传力；三是具备接近于生产实际的性状鉴定圃。玉米养分效率的评价，田间条件下的籽粒产量是最主要、也是最重要的选择指标。土壤氮素供应水平，也就是氮高效品种的选择压力则最为关键。本研究在不存在氮×基因型互作的实验中，高低氮条件下的品种间变异系数无显著差异；而在存在氮素×基因型互作的这类试验中，低氮下的变异系数显

著高于中氮和高氮水平。因此，只是在适当的氮胁迫程度下，才能观察到最大的遗传变异。缺氮小区通常采用不施肥处理。根据 CIMMYT 的经验，低氮小区的产量应该是正常供氮的 25%~35%。在这种情况下可以选择到真正的 LNE 品种。如果低氮下产量的水平不低于正常的 20%，则缺氮处理不必要施肥。但也有人认为，缺氮处理中玉米生产下降幅度应该在

35%~40%左右^[25],也就是说低氮下的产量达到正常产量的60%~65%。然而有人认为,在这种情况下得到的氮高效品种更可能是因为产量遗传潜力较高,很难区分出真正的LNE品种^[15]。本研究发现,当低氮小区的产量为正常供氮的25%~60%时,基本都存在基因型和氮肥的互作效应,遗传力也保持在75%,品种间变异较大,能够筛选到不同类型的NUE品种。而减产幅度小于15%的地块很难出现基因型与氮水平的互作。

虽然高氮下的作物产量与低氮下的产量有较好的相关性,如果目标地区的低氮不严重(比如产量下降低于10%),那直接的多环境条件下选择高产品种,往往可以同时提高低氮下的产量^[26]。但是,随着低氮胁迫的加重,这种高氮产量与低氮产量的相关性会逐渐降低^[27,28],如表5中减产幅度为27.0%~56.1%时,高低氮间产量已不存在表型相关。如果单独在高氮条件下进行品种选择,其选择效率要低于在两个氮水平同时选择^[15]。反过来,直接在低氮下进行选择则可以提高效率30%,而且事实表明,如果低氮条件下产量与高氮下产量的相关系数达到0.65左右,则直接在低氮条件下选择产量高的品种,往往其在高氮下也可以获得较高的产量^[28]。

3.2 高产氮高效品种节氮增产潜力

氮高效是一个相对的概念,针对不同研究目的,选择不同的对照,可以将品种对氮的反应划分成几种类型。本研究参考刘建安等人^[20]、米国华等人^[18]的方法,以不同氮水平下的供试玉米品种的产量平均值为对照,将参试品种划分为HNE, LNE, EE和双低效4种类型。本研究发现,在氮肥充足供应条件下,目前东华北地区HNE和EE品种具有增产8%~10%,节氮16%~21%的潜力;HNE品种对氮肥响应度高(低氮胁迫下减产幅度达52.6%),属于“超高产”品种^[29]。而EE品种在实现高产氮高效协同提高的过程有着更大的遗传潜力,同时具有综合的抗逆性,育种者应以此作为选育目标。上述两种类型品种可统称为高产氮高效品种,在集约化栽培条件下具有良好的应用前景。目前大面积推广的郑单958、先玉335等品种

都属于此种类型(表7和8)。在国际上,Worku等人^[30]将16个热带玉米品种,同样按照高低氮平均值作为标准划分成4种类型,其中EE品种在高氮下高于平均值10.7%,节氮潜力为12.7%;HNE品种高氮下高于平均值15.1%,节氮潜力为17%。Coque和Gallais^[31]分析了1990~2002年法国审定的18个品种,其整体变异较小,3种高效类型品种高低氮下都接近平均值,节氮潜力较小。以上分析表明,在在东北地区的中高肥力土壤上选择种植高产氮高效玉米品种,种植60000株/ha,可能达到增产10%~15%,节氮10%~20%的效果,建议施氮量可以选择180~200 kg/ha。

Logroño等人^[32]报道印度受低氮胁迫的耕地有 2.50×10^6 ha,造成减产达50%;中国南方受低氮胁迫的耕地有 1.15×10^6 ha,造成减产10%~20%。在巴西,超过80%的耕地属于低肥力和易涝土壤,少数农民因施不起氮肥,导致玉米产量只能维持在 $1 \sim 2 \times 10^3$ kg/ha^[33]。在非洲,由于干旱、低pH和低氮等非生物胁迫,玉米平均产量只有 1.3×10^3 kg/ha。因此,选育LNE玉米品种对于解决国际粮食安全同样至关重要^[15,34]。本研究表明,在低氮胁迫下,LNE品种具有增产12%的潜力(表7)。当前推广品种中,浚单20、农大108表现出较好的耐低氮性。陈范骏等人^[35]和春亮等人^[36]的研究也表明,低氮下农大108具有较高的产量。CIMMYT选育的LNE品种在南部非洲已见成效,推广的42个品种在 $2 \sim 5 \times 10^3$ kg/ha产量范围内,比当地品种的41个品种增产潜力更大,在综合生物胁迫条件下(干旱、低pH、低氮等),增产达11%~20%,在低氮胁迫下比当地品种增产18%,但在高产范围内($5 \sim 10 \times 10^3$ kg/ha),增产潜力只有3%~7%^[34]。德国霍恩海姆大学在低氮下筛选的欧洲主推品系,所组配的杂交种更加适应低氮环境,与在高氮环境下筛选的品系组配的杂交种相比,产量和氮吸收效率都提高12%^[37]。Worku等人^[30]的研究中,LNE品种的增产潜力为14.5%。综合分析上述结果,在东北地区的低肥力土壤或者经济不发达地区选择种植LNE品种,可能达到增产10%~20%的效果,建议施氮量为120~225 kg/ha。

参考文献

- 1 Maplecroft. Food Security Risk Index (FSRI). 2011, Available from: URL: http://maplecroft.com/about/news/food_security.html
- 2 国家发展改革委会. 国家粮食安全中长期规划纲要(2008~2020年). 中央政府门户网站, <http://www.gov.cn>
- 3 张福锁, 崔振岭, 王激清, 等. 中国土壤和植物养分管理现状与改进策略. 植物学通报, 2007, 24: 687~694

- 4 Matson P A, Parton W J, Power A G, et al. Agricultural intensification and ecosystem properties. *Science*, 1997, 277: 504–509
- 5 Tilman D, Cassman K G, Matson P A, et al. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 2002, 418: 671–678
- 6 张福锁, 米国华, 刘建安. 玉米氮效率遗传改良与应用. *农业生物技术学报*, 1997, 5: 112–117
- 7 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. *中国农业科学*, 2001, 34: 311–316
- 8 李登海, 张永慧, 杨今胜, 等. 育种与栽培相结合紧凑型玉米创高产. *玉米科学*, 2004, 12: 69–71
- 9 陈国平, 赵久然, 张经武, 等. 春玉米创最高纪录栽培技术的研究. *玉米科学*, 1995, 3: 26–30
- 10 Chen X P, Cui Z L, Vitousek P M, et al. Integrated soil–crop system management for food security. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2011, 108: 6399–6404
- 11 FAO(The Food and Agriculture Organisation of the United Nations). The agricultural production domain covers. 1995, <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>
- 12 Pollmer W G, Eberhard D, Klein D. et al. Studies on maize hybrids involving inbred lines with varying protein content. *Z Pflanzenzuecht*, 1978, 80: 142–148
- 13 Moll R H, Kamprath E J, Jackson W A. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. *Agron J*, 1982, 74: 562–568
- 14 米国华, 刘建安, 张福锁. 玉米杂交种的氮农学效率及其构成因素剖析. *中国农业大学学报*, 1998, 3(增刊): 97–104
- 15 Bänzinger M, Edmeades G O, Beck D, et al. Breeding for Drought and Nitrogen Stress Tolerance in Maize: from Theory to Practice. Mexico: International Maize and Wheat Improvement Center, 2000
- 16 Luce G, Mathesius J. Hybrid response to nitrogen fertilizer: are there differences? *Pioneer Agron Sci*, 2009, 19: 1–3
- 17 陈范骏, 米国华, 张福锁. 氮高效玉米新品种中农 99 的选育. *作物杂志*, 2009, 6: 103–104
- 18 米国华, 陈范骏, 张福锁. 作物养分高效的生理基础与遗传改良. 北京: 中国农业大学出版社, 2012. 1–73
- 19 Bänzinger M, Cooper M. Breeding for low input conditions and consequences for participatory plant breeding: Examples from tropical maize and wheat. *Euphytica*, 2001, 122: 503–519
- 20 刘建安, 米国华, 张福锁. 不同基因型玉米氮效率差异的比较研究. *农业生物技术学报*, 1999, 7: 248–254
- 21 郭李萍, 王兴仁, 张福锁, 等. 不同年份施肥对作物增产效应及肥料利用率的影响. *中国农业气象*, 1999, 20: 20–23
- 22 陈范骏, 米国华, 张福锁, 等. 京津唐地区部分夏玉米品种节氮潜力的估算. *玉米科学*, 2009, 17: 115–117
- 23 Hallauer A R, Miranda J B. Quantitative genetics in maize breeding. Ames: Iowa State University Press, 1981
- 24 翟婉莹, 佟立伟. 农业试验统计 BASIC 程序. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1987. 221–228
- 25 Gallais A, Coque M. Genetic variation and selection for nitrogen use efficiency in maize: a synthesis. *Maydica*, 2005, 50: 531–537
- 26 Anbessa Y, Juskiw P, Good A, et al. Selection efficiency across environments in improvement of barley yield for moderately low nitrogen environments. *Crop Sci*, 2010, 50: 451–457
- 27 Bänzinger M, Betran F J, Lafitte H R. Efficiency of high-nitrogen selection environments for improving maize for low-nitrogen target environments. *Crop Sci*, 1997, 37: 1103–1109
- 28 Presterl T, Seitz G, Landbeck M, et al. Improving nitrogen use efficiency in European maize: estimation of quantitative parameters. *Crop Sci*, 2003, 43: 1259–1265
- 29 米国华, 陈范骏, 春亮, 等. 玉米氮高效品种的生物学特征. *植物营养与肥科学报*, 2007, 13: 155–159
- 30 Worku M, Bänzinger M, Erley G S, et al. Nitrogen uptake and utilization in contrasting nitrogen efficient tropical maize hybrids. *Crop Sci*, 2007, 47: 519–527
- 31 Coque M, Gallais A. genetic variation among european maize varieties for nitrogen use efficiency under low and high nitrogen fertilization. *Maydica*, 2007, 52: 383–397
- 32 Logroño M L, Lothrop J E. Impact of drought and low nitrogen on maize production in Asia. In: Edmeades, G O, Bänzinger M, Mickelson H R, et al., eds. Developing drought- and low N-tolerant maize. Proceedings of a Symposium, International Maize and Wheat Improvement Center, El Batán, Mexico. Mexico: International Maize and Wheat Improvement Center, 1996. 39–43
- 33 Machado A T, Fernandes M S. Participatory maize breeding for low nitrogen tolerance. *Euphytica*, 2001, 122: 567–573
- 34 Bänzinger M, Setimela P S, Hodson D, et al. Breeding for improved drought tolerance in maize adapted to southern Africa. In: Proceedings of the 4th International Crop Science Congress, Brisbane, Australia, 2004
- 35 陈范骏, 米国华, 张福锁, 等. 华北区主栽玉米杂交种的氮效率分析. *玉米科学*, 2003, 11: 78–82
- 36 春亮, 陈范骏, 张福锁, 等. 不同氮效率玉米杂交种的根系生长、氮素吸收与产量形成. *植物营养与肥科学报*, 2005, 11: 615–619
- 37 Presterl T, Groh S, Landbeck M, et al. Nitrogen uptake and utilization efficiency of European maize hybrids developed under conditions of low and high nitrogen input. *Plant Breeding*, 2002, 121: 480–486