

## 细胞质雄性不育玉米的根系特性和氮效率研究

李从锋<sup>1</sup>, 刘 鹏<sup>1</sup>, 董树亭<sup>1</sup>, 张吉旺<sup>1</sup>, 王空军<sup>1</sup>, 贾士芳<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>山东农业大学作物生物学国家重点实验室, 山东泰安 271018; <sup>2</sup>太原科技大学化学与生物工程学院, 太原 030021)

**摘要:** 【目的】探讨细胞质雄性不育玉米的根系特性和氮素吸收利用规律。【方法】在土柱栽培条件下, 选择目前生产中广泛应用的骨干自交系 478 和齐 319 的细胞质雄性不育系 (CMS) 和其同型保持系 (可育系) 为试验材料, 比较分析雄性不育系及其可育系灌浆期根系特性的差异及对缺氮的响应。【结果】CMS 玉米的籽粒产量和千粒重均高于其同型可育植株 ( $P < 0.05$ ), 生物产量差异不显著 ( $P > 0.05$ ), 收获指数明显较高 ( $P < 0.05$ ), 且缺氮条件下优势更为明显。CMS 玉米灌浆期具有较高的根系干重、根系体积和根系总活力, 且深层根系分布相对较多, 根系活力较强, 有效延长了根系的功能期, 促进了植株对养分和水分的吸收。CMS 玉米氮素积累总量高于其同型可育系 ( $P < 0.05$ ), 成熟期氮素在茎秆和籽粒中分配较多; 低氮水平下, CMS 玉米的氮素转移率、贡献率和氮素利用率均显著高于其同型可育系 ( $P < 0.05$ ); CMS 玉米单株氮效率较高, 氮响应度相对较低。【结论】细胞质雄性不育玉米籽粒产量高、氮效率高与其深层根量多、根系活力强密切相关。

**关键词:** 玉米; 细胞质雄性不育; 根系特性; 氮效率

## Root Traits and Nitrogen Efficiency of Cytoplasmic Male Sterility Maize

LI Cong-feng<sup>1</sup>, LIU Peng<sup>1</sup>, DONG Shu-ting<sup>1</sup>, ZHANG Ji-wang<sup>1</sup>, WANG Kong-jun<sup>1</sup>, JIA Shi-fang<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>State Key Laboratory of Crop Biology, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, Shandong; <sup>2</sup>Institute of Chemistry and Biology Engineering, Taiyuan University of Science of Technology, Taiyuan 030021)

**Abstract:** 【Objective】Male sterile characteristic plays an important role in the utilization of heterosis. The purpose of this study was to investigate the root traits and nitrogen uptake and utilization rule of cytoplasmic male sterile (CMS) lines. 【Method】In soil column experiment, two inbred lines, cytoplasmic male sterility (478CMS and Q319CMS) and homotypic fertile lines(478 and Q319) were used to analyze the difference among root traits, nitrogen uptake and utilization efficiency between two inbred lines. 【Result】Grain yield and 1000-kernel weight of CMS lines were higher than those of homotypic lines ( $P < 0.05$ ), no difference in biomass ( $P > 0.05$ ) was found, whereas harvest index was significantly higher in CMS lines under nitrogen deficiency ( $P < 0.05$ ). The root weight, root volume and total root activity of CMS lines overweighed those of homotypic lines during grain filling period ( $P < 0.05$ ), furthermore advantages in depth soil layer was obvious, which could prolong root functional period effectively and promote root absorption in water and nutrient. Total nitrogen accumulation amount of CMS lines was distinctly higher than their homotypic lines ( $P < 0.05$ ), with more nitrogen distributed to stalk and grain in CMS lines. Both N transportation efficiency and N contribution rate of CMS lines were higher in contrast to the homotypic lines under nitrogen deficiency ( $P < 0.05$ ). Compared with homotypic lines, CMS lines maintained higher individual nitrogen utilization efficiency than their homotypic lines, but the response to N fertilizer was relatively lower. 【Conclusion】The higher grain yield and higher nitrogen efficiency of CMS lines were closely correlated with more root weight distributed in deeper layer and stronger root physiological activity.

**Key words:** Maize (*Zea mays* L.); Cytoplasmic male sterility; Root traits; Nitrogen efficiency

收稿日期: 2007-11-17; 接受日期: 2008-06-04

基金项目: 国家科技支撑计划 (2007BAD31B04), 山东省农业重大应用技术创新项目, 国家自然科学基金项目 (30571098, 30771282) 和山东省自然科学基金项目 (Q2006D03)

作者简介: 李从锋 (1979-), 男, 山东金乡人, 博士研究生, 研究方向为玉米栽培生理生态。Tel: 0538-8245838; E-mail: lcfynn@163.com。通讯作者董树亭 (1953-), 男, 山东诸城人, 教授, 博士, 研究方向为玉米生理生态。Tel: 0538-8241591; E-mail: stdong@sdau.edu.cn

## 0 引言

【研究意义】玉米是中国种植面积最大的粮食作物之一，氮素是玉米获得最高产量的重要限制因素，但现代农业中玉米的氮肥利用率不断下降<sup>[1]</sup>，另外作物氮素营养缺乏现象普遍存在<sup>[2]</sup>，选育在低氮条件下能正常生长并获得较高产量的作物品种，是减少氮肥施用量、减少环境污染、增加粮食产量的重要途径之一。目前，已在高等植物 43 科 162 属 617 个种或种间杂种中发现雄性不育<sup>[3]</sup>。采用雄性不育材料配制玉米杂交种避免人工去雄授粉，较大限度地发挥了优良杂交种的增产潜力，使玉米大规模利用杂种优势成为可能。因此，探讨低氮条件下具有相对较高产量的细胞质雄性不育 (CMS) 系根系特性和氮效率，对玉米氮高效育种和雄性不育系广泛应用都具有重要意义。【前人研究进展】细胞质雄性不育对单交种或双交种产量具有正效应<sup>[4]</sup>，而不育杂交种比同型可育杂交种增产更为明显<sup>[5,6]</sup>。正常去雄与细胞质雄性不育杂交种在胁迫条件下可能获得较高的产量<sup>[7]</sup>，植株产量提高的幅度因胁迫的程度不同而变化<sup>[8]</sup>。作物品种在矿质营养的吸收利用上，存在明显的遗传多样性<sup>[9]</sup>，选育高利用效率的农作物新品种，是提高氮素利用效率的新型有效途径。根系是作物的主要吸收器官，是限制作物产量的关键因素之一<sup>[10,11]</sup>，根系形态和空间的分布显著影响植株对养分的吸收<sup>[12]</sup>，对作物的氮效率和产量的形成都具有重要影响。【本研究切入点】前人对 CMS 玉米的最终产量形成和普通玉米的根系特性及其氮素利用进行了较多研究，但对雄性不育材料根系特性和氮效率的研究鲜见报道。478 和齐 319 都是目前生产中广泛应用的骨干自交系，以其为亲本的杂交种在全国已有较大的推广面积，但缺乏对其雄性不育系基本特性的研究，不利于 CMS 玉米的广泛应用。【拟解决的关键问题】因此本文选择了 478 和齐 319 的 CMS 系及其同型可育系为材料，比较低氮条件下两材料的根系特性和氮效率的差异，以期对雄性不育玉米的充分利用提供理论依据。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 试验材料

供试材料选用玉米细胞质雄性不育系 478CMS 和齐 319CMS 及其同型可育系 478 和齐 319。478 和齐 319 均是生产上利用较多的骨干自交系，配合力高，抗逆性好，抗病性强；细胞质不育系花药不外露、花

药内无花粉完全不育株达 98% 以上，且不育性稳定，株型、抗病性与其同型系基本一致。

### 1.2 试验设计

试验采用土柱栽培，于 2004~2005 年在山东农业大学黄淮海区域玉米技术创新中心田间试验场进行，以沥青油毡纸卷成直径 30 cm、高 100 cm 内层为防渗膜的圆筒状（内部填土 80 cm 高），桶柱排好后放于挖好的高 80 cm 的方形土坑中，排列行距为 66.7 cm，按照田间土壤状况装土入柱，土壤有机质含量 8.16 g·kg<sup>-1</sup>，全氮含量 0.55 g·kg<sup>-1</sup>，碱解氮 32.56 mg·kg<sup>-1</sup>，速效磷 31.5 mg·kg<sup>-1</sup>，速效钾 26.6 mg·kg<sup>-1</sup>。土柱周围用土填实，播种前 1 月进行灌水沉实，使土柱与大田状况尽可能一致。试验为随机区组设计，设不施氮 (0 kg·ha<sup>-1</sup>) 与正常施氮 (300 kg·ha<sup>-1</sup>) 两个氮水平，不育与可育材料在田间随机排列，3 次重复。氮肥全部作为基肥，于播种前施入。6 月 11 日播种，每穴播 3 粒种子，出苗后 5 叶期定植 1 株，玉米生长期给予良好管理。不育和可育材料均采用人工套袋饱和授粉，以保证授粉的均一性和植株的结实率，其中不育系的花粉均来自其保持系（同型可育材料）。

分别在花后 0、10、20、30、40 d 系统取样，调查时先将土柱挖出，分 0~20 cm，20~40 cm，40~80 cm 土层 3 段冲洗，将土和杂质去除，取净根进行测定分析。地上部分植株按叶片、茎秆和籽粒分为 3 部分，80℃ 烘干 48 h，称重、粉碎过 60 目筛，待室内测定。成熟期收获，考种测产。

### 1.3 测定项目及方法

全氮含量测定采用 KDY-9820 型凯氏定氮仪；根系体积测定采用排水法；根系活力测定采用 TTC 还原法<sup>[13]</sup>。

植株氮积累量、氮利用效率、氮收获指数、氮效率和氮响应度的计算，参照 Moll 等<sup>[14]</sup>的方法：氮积累量 (g/plant) = 植株含氮量 (%) × 生物量；氮利用效率 (%) = 籽粒产量 / 植株氮积累总量；氮收获指数 (%) = 籽粒氮积累总量 / 植株氮积累总量；氮效率 = 籽粒产量 / 土壤的总供氮量；氮响应度 = (正常施氮水平玉米产量 - 不施氮水平玉米产量) / 施氮量 (以纯氮计算)。

氮营养参数计算：开花前氮吸收量 = 开花期植株氮素积累总量；成熟期氮总吸收量 = 成熟期植株茎、叶、籽粒氮素之和；开花后吸收量 = 成熟期氮总吸收量 - 开花前氮吸收量；氮转移量 = 开花前氮吸收量 - 成熟期氮吸收量；转移率 = 转移量 / 开花前氮吸收量；贡献率 = 转移率 / 收获期籽粒氮吸收量。

1.4 统计分析

采用 DPS V3.01 软件进行统计分析，并检验变量间的差异显著性，Sigmaplot 10.0 作图。

2 结果与分析

2.1 产量及其构成

由表 1 可看出，CMS 玉米的籽粒产量显著高于其同型可育植株 ( $P < 0.05$ )，平均增产 11.5%。产量构成中，CMS 玉米的千粒重显著高于其可育系 ( $P < 0.05$ )，雄性不育系的收获指数显著较高 ( $P < 0.05$ )，不施氮条件下增幅更为明显。相同条件下，CMS 玉米的生物量与其同型可育系差异并不显著 ( $P > 0.05$ )。

表 1 细胞质雄性不育系和保持系的产量及其构成

Table 1 Grain yield and its components of cytoplasmic male sterile line and its maintainer

材料	处理	单株籽粒产量	千粒重	单株生物量	收获指数
Material	Treatment	Grain yield (g/plant)	1000-kernel weight (g)	Biomass (g/plant)	Harvest index
478	+N	116.66c	257.45b	262.21b	0.44c
	-N	106.50d	235.73c	241.82c	0.44c
478CMS	+N	128.78a	273.28a	275.14a	0.47b
	-N	122.82b	270.58a	235.70c	0.52a
Q319	+N	117.04b	327.74b	295.64a	0.40c
	-N	105.07c	316.80c	264.57b	0.40c
Q319CMS	+N	128.45a	343.14a	302.19a	0.43b
	-N	116.44b	336.26b	258.67b	0.45a

同列字母相同者表示差异未达显著水平 ( $P > 0.05$ )，字母不同者表示差异达显著水平 ( $P < 0.05$ )。下同

The same alphabets in right side of the same column show no significance ( $P > 0.05$ ), on the contrary, having significance ( $P < 0.05$ ). The same as below

2.2 根系特性

由表 2 看出，正常施氮条件下，花后 CMS 玉米灌浆期根系总干重显著高于其同型可育系 ( $P < 0.05$ )，不施氮条件下，478CMS 的根系干重显著高于其同型可育系 ( $P < 0.05$ )，而齐 319CMS 和其同型可育系差异不显著 ( $P > 0.05$ )。不同土层内根系重量的分布比例表现为 CMS 玉米在 0~20 cm 土层和 20~40 cm 土层相对较低，40~80 cm 土层显著高于其同型可育系

( $P < 0.05$ )。不同土层根系体积数值和分布比例均与其根重趋势一致，且 CMS 玉米深层分布比例增幅更大。根系总活力是根系活力和根系鲜重的乘积，是根系群体活力的总和，可以较好反应根系总体能力。不育植株灌浆期根系总活力显著高于其可育系 ( $P < 0.05$ )，其中正常施氮和不施氮条件下分别提高 9.4% 和 9.1%。不同土层根系总活力的分布比例在 0~20 cm 和 20~40 cm 土层差异较小，40~80 cm 土层明显较

表 2 细胞质雄性不育系和保持系的根重、根体积、根系活力 (灌浆期)

Table 2 Root weight, root volume and root activity of cytoplasmic male sterile line and its maintainer (filling stage)

材料	处理	根干重 Root dry weight (g/plant)				根体积 Root volume (cm <sup>3</sup> /plant)				根系活力 Total root activity(mg TTC·g <sup>-1</sup> plant·h <sup>-1</sup> )			
		总根重 Total root weight	不同土层的分布比例 (%) Percent of different soil layer			总体积 Total root volume	不同土层的分布比例 (%) Percent of different soil layer			总活力 Total root activity	不同土层的分布比例 (%) Percent of different soil layer		
			0~20	20~40	40~80		0~20	20~40	40~80		0~20	20~40	40~80
			cm	cm	cm		cm	cm	cm		cm	cm	cm
478	+N	33.41c	83.2	11.7	5.1	271.79c	80.1	14.9	5.1	32.57a	75.1	17.1	7.8
	-N	26.91d	76.2	18.8	5.1	243.39d	72.8	22.1	5.1	21.50c	74.1	17.9	8.0
478CMS	+N	44.02a	79.1	13.6	7.3	391.73a	76.7	15.1	8.2	33.63a	77.1	15.1	7.9
	-N	39.22b	80.8	14.1	5.2	345.47b	73.6	18.8	7.6	24.17b	72.7	15.9	11.5
Q319	+N	30.29b	80.1	13.0	6.9	280.94b	79.1	13.1	7.9	20.77b	78.9	16.1	5.1
	-N	26.64c	75.1	17.0	7.9	265.96c	75.2	15.9	8.9	20.32c	72.8	19.8	7.4
Q319CMS	+N	38.34a	78.7	11.0	10.3	329.62a	76.8	11.8	11.4	24.00a	77.1	15.8	7.1
	-N	26.71c	70.1	13.4	16.5	268.68c	68.2	13.8	18.0	21.50b	72.1	14.1	13.8

高。说明不育植株的深层根系分布相对较多，根系活力较强，延长了根系的功能期，促进其对养分和水分的吸收。

### 2.3 氮素积累

由表 3 可看出，CMS 玉米的整株氮素积累总量显著高于其同型可育系 ( $P < 0.05$ )，在正常施氮和不施氮条件下，平均增幅分别为 20.3% 和 12.1%。成熟期植株不同器官中氮素积累量表现为：籽粒 > 茎秆 > 叶片，相同氮素条件下，不同器官中的 CMS 玉米氮素积累量均高于其可育系 ( $P < 0.05$ )，其中茎秆和籽粒中氮素积累量优势明显。不施氮条件下，各器官的氮素积累量均显著降低 ( $P < 0.05$ )。不同器官中的氮素分布比例，不同育性材料间差异并不显著，但籽粒中的氮素分布比例相对较高。

### 2.4 氮素的运转

由表 4 可看出，CMS 玉米花前氮素积累量显著高于其可育系 ( $P < 0.05$ )，正常施氮和不施氮条件下分别提高 30% 和 27%；而对花后氮素积累量来说，正常施氮条件下，CMS 玉米显著高于其同型可育植株 ( $P < 0.05$ )；不施氮条件下，不同育性材料间差异不明显。氮素转移率和贡献率不育系显著较高 ( $P < 0.05$ )，且在低氮水平下优势更为明显。两种氮素条件下，CMS 玉米的氮素利用率均显著高于其可育系 ( $P < 0.05$ )，平均提高 4.75%，但其氮收获指数相对较低，并未表现出相应优势。不施氮条件下，植株中氮素的积累量和氮收获指数显著升高 ( $P < 0.05$ )。氮素的转移率、贡献率和氮素利用率明显提高，其中 CMS 玉米的增幅更大。

### 2.5 氮效率和氮响应度

由图可以看出，两类型玉米单株氮效率表现为 CMS

表 3 细胞质雄性不育系和保持系的氮素积累量 (NAA) (成熟期)

Table 3 Nitrogen accumulation amount (NAA) in organs of cytoplasmic male sterile line and its maintainer (maturity)

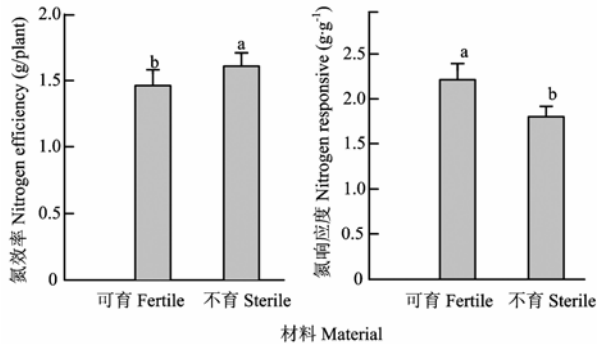
材料 Material	处理 Treatment	全株氮素积累 N accumulation amount of per plant (g/plant)	茎 Stalk		叶 Leaf		籽粒 Grain	
			NAA(g)	Percent (%)	NAA(g)	Percent (%)	NAA(g)	Percent (%)
478	+N	3.09b	1.00b	32.4	0.53c	17.2	1.56a	50.5
	-N	2.19d	0.83c	37.9	0.41d	18.7	0.95c	43.4
478CMS	+N	3.48a	1.18a	33.9	0.71a	20.4	1.59a	45.7
	-N	2.34c	0.68d	29.1	0.65b	27.8	1.01b	43.2
Q319	+N	2.63b	0.66c	25.1	0.51b	19.4	1.46b	55.5
	-N	2.31d	0.60c	26.0	0.45d	19.5	1.26d	54.5
Q319CMS	+N	3.37a	1.22a	36.2	0.55a	16.3	1.60a	47.5
	-N	2.71c	0.90b	33.2	0.48c	17.7	1.33c	49.1

表 4 细胞质雄性不育系和保持系的氮素运转

Table 4 Nitrogen translation of cytoplasmic male sterile line and its maintainer

材料 Material	处理 Treatment	花前吸收量 Absorption before flower (g/plant)	花后吸收量 Absorption after flower (g/plant)	输出率 Transportation efficiency (%)	贡献率 Contribution rate (%)	氮利用效率 N utilization efficiency (NUE)	氮收获指数 N harvest index (NHI)
478	+N	1.58b	1.51b	4.52	2.89	0.38c	0.51a
	-N	1.15d	1.04c	9.50	9.95	0.53b	0.48b
478CMS	+N	1.80a	1.68a	6.93	4.44	0.40c	0.48b
	-N	1.26c	1.08c	14.24	14.13	0.59a	0.48b
Q319	+N	1.36c	1.27b	6.69	3.45	0.36c	0.61a
	-N	1.17d	1.14c	2.50	1.98	0.44b	0.53b
Q319CMS	+N	1.99a	1.38a	31.15	20.65	0.45b	0.52b
	-N	1.69b	1.02d	39.71	29.81	0.50a	0.57a

玉米显著高于其同型可育系 ( $P < 0.05$ )，平均高 10.1%。CMS 玉米单株氮响应度显著低于可育系 ( $P < 0.05$ )，平均低 23.2%，说明不育植株在低氮条件下，具有相对较高的生产能力。



具有不同字母的柱体表示差异显著 ( $P = 0.05$ )  
Bars with different letters are significant at 0.05 level

图 细胞质雄性不育系及其可育系氮效率和氮响应度比较  
Fig. Comparison of nitrogen efficiency and nitrogen responsiveness of cytoplasmic male sterile line and its maintainer

### 3 讨论

玉米细胞质雄性不育可以提高籽粒产量，其增产效应在逆境条件下表现明显<sup>[4,15]</sup>。研究表明，两种氮素水平下，不育植株的籽粒产量和千粒重都显著高于其同型可育系，且在不施氮条件优势更大，生物产量差异不显著，收获指数明显较高，表明不育植株较高的籽粒产量是由于其花后具有较高物质转运效率。低氮条件下，雄性不育玉米的籽粒产量表现出较高的正效应，说明其对土壤中氮素的吸收利用效率可能较高。

根系是玉米氮素吸收的主要器官，其优劣对氮素的吸收和利用有重要影响。本试验中，灌浆期不育植株的平均根系干重、平均根系体积和根系总活力都明显高于其可育系，且深层根系分布相对多，根系活力强。可见，雄性不育玉米的根系相对发达，这可能由于其籽粒充实期具有较高叶片生理质量和光合效率<sup>[16]</sup>。植株的生长发育是地上和地下部分协调发展的结果，地上部分可为根系提供充足的光合产物，有利于根系良好的形态结构和生理功能的建成。较大的根系生物量可以获得较高的生物产量<sup>[17,18]</sup>，根系活力强，吸收

面积大，有利于根系吸收水分和养分，同时根系的作用还取决于它们的空间分布<sup>[19]</sup>。不育植株具有优良的根系特征，可有效延长根系的功能期，维持根系较高生理活性。不施氮条件下，相比其同型可育系，齐 319CMS 的根系体积和根系干重未表现出优势，但其深层根量分布明显较多，且根系活力显著高于其同型可育系，使其对氮素的吸收与转运效率较高，从而有利于获得较高的产量。

本试验中，不育植株的氮素积累总量具有明显优势，不同施氮水平花后氮素积累量差异并不显著，但向籽粒中转运的营养物质明显较高；不施氮水平下不育植株具有较高氮素输出率和相对较高的氮素转运效率。说明不育植株具有相对较高的氮素积累量和优良的根系特征，这都有力的促进了氮素向籽粒中的运转效率，而不施氮条件在一定程度上刺激了不育植株对氮素营养的吸收和运转<sup>[14]</sup>。源对同化物的供给和库对同化物的需求是通过暂时贮藏在茎秆中的同化物来缓冲的<sup>[20]</sup>，而最终的籽粒重量取决于籽粒库大小和用来填充这些库的同化物的多少<sup>[21]</sup>。本试验中雄性不育植株茎秆中的氮素积累量较多，这在低氮水平源对同化物的供给不占明显优势的条件下，对充分利用茎秆中的营养物质，使其运输物质的通道（流）相对畅通，有效地促进籽粒灌浆充实和产量提高起到了重要作用。

C<sub>4</sub> 植物的光合氮利用效率比 C<sub>3</sub> 作物高，但氮仍是限制产量的主要因素<sup>[22]</sup>。Moll 等<sup>[14]</sup>认为，不同氮效率对产量的影响因供氮水平而异，在不施氮条件下，氮效率的差异主要是所积累氮的利用效率不同所致；而在施氮条件下，氮吸收效率则起主要作用。本试验中，不育植株的氮收获指数并未表现出相应优势，而氮素利用率显著较高，在低氮水平下优势更为明显；单株的氮效率较高，氮响应度较低。说明低氮水平下不育植株较高的氮素转运效率，使其对氮素利用明显提高，且植株对低氮条件反应不敏感，这都可作为玉米氮高效品种选育中的重要参考指标。

中国玉米的肥料利用率较低，仅为世界平均水平的 50%<sup>[23,24]</sup>，提高玉米的氮肥利用效率是当前农业上面临的重大课题，而挖掘玉米本身遗传潜力，选育氮高效利用的品种是提高氮肥利用效率、增加粮食产量的有效途径<sup>[25,26]</sup>。雄性不育材料配制玉米杂交种避免人工去雄授粉，较大限度地发挥了优良杂种的增产潜力，其植株同时具有深层根量多、根系活力强、氮效率高的特点，这都可作为作物育种工作中氮高效品种的

选育和雄性不育广泛利用提供可借鉴的思路。

## 4 结论

不育植株比其同型可育植株平均增产 11.5%，产量构成因素中千粒重优势较大。花后不育植株灌浆期具有相对较高的根系干重、根系体积和根系总活力，且深层根系分布相对较多，根系活力较强，有效延长了根系的功能期，有利于养分的吸收与运转。不育植株的氮素积累总量具有明显优势，向籽粒中运转的营养物质较高，低氮条件下具有较高氮素输出率、贡献率和氮素利用率，单株的氮效率较高，氮响应度较低。不育植株籽粒产量高、氮效率高与其深层根量多、根系活力强密切相关。

## References

- [1] 陈范骏, 米国华, 张福锁, 王 艳, 刘向生, 春 亮. 华北区部分主栽玉米杂交种的氮效率分析. *玉米科学*, 2003, (1): 78-82.  
Chen F J, Mi G H, Zhang F S, Wang Y, Liu X S, Chun L. Nitrogen use efficiency in some of main hybrids grown in North China. *Journal of Maize Science*, 2003, (1): 78-82. (in Chinese)
- [2] 米国华, 刘建安, 张福锁. 玉米氮效率生理生化基础及遗传改良进展. *玉米科学*, 1997, (2): 9-13.  
Mi G H, Liu J A, Zhang F S. Development of the bases in physiology and biochemistry on nitrogen efficiency and heredity improved of maize. *Journal of Maize Science*, 1997, (2): 9-13. (in Chinese)
- [3] Kaul M L H. *Male Sterility in Higher Plants*. Berlin: Springer-Verlag, 1988.
- [4] Rogers J S, Edwardson J R. The utilization of cytoplasm male-sterile inbreds in the production of corn hybrid. *Agronomy Journal*, 1952, 44: 8-13.
- [5] Sanford J O, Grogan C O, Jordan H V. Influence of male-sterility on nitrogen utilization of corn, *Zea mays* L. *Agronomy Journal*, 1965, 575: 80-583.
- [6] Printer L. Effect of rough detasseling on some agronomic traits of maize (*Zea mays* L.) progenies. *Acta Agronomica Academiae Scientiarum Hungaricae*, 1986, 35: 276-289.
- [7] Duvik D N. Cytoplasmic pollen sterility in corn. *Advances in Genetics*, 1965, 13: 51-56.
- [8] Chinwuba P M, Grogan C O, Zuber M S. Interaction of detasseling, sterility, and spacing on yields of maize hybrids. *Crop Science*, 1961, 1: 279-280.
- [9] 王 艳, 米国华, 陈范骏, 张福锁. 玉米氮素吸收的基因型差异及其与根系形态的相关性. *生态学报*, 2003, 23(2): 297-302.  
Wang Y, Mi G H, Chen F J, Zhang F S. Genotypic differences in nitrogen uptake by maize inbred lines its relation to root morphology. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(2): 297-302. (in Chinese)
- [10] 王法宏, 王旭清, 刘素英, 王晓理. 根系分布与作物产量的关系研究进展. *山东农业科学*, 1997, (4): 48-51.  
Wang F H, Wang X Q, Liu S Y, Wang X L. The latest progress on the relation between root distribution and crop yield. *Journal of Shandong Agricultural Science*, 1997, (4): 48-51. (in Chinese)
- [11] 王玉贞, 李维岳, 尹枝瑞. 玉米根系与产量关系的研究进展. *吉林农业科学*, 1999, 24(4): 6-8.  
Wang Y Z, Li W Y, Yin Z R. The relation between root distribution and crop yield. *Journal of Jilin Agricultural Science*, 1999, 24(4): 6-8. (in Chinese)
- [12] 鄂玉江, 戴俊英, 顾慰连. 玉米根系的生长规律及其与产量关系的研究 I. 玉米根系生长和吸收能力与地上部分的关系. *作物学报*, 1988, 14(2): 149-154.  
E Y J, Dai J Y, Gu W L. Study on the relationship between root growth and yield in maize (*Zea Mays* L.) I. Relationships between the growth and absorption ability of the roots and the growth and development of the above-ground parts of maize. *Acta Agronomica Sinica*, 1988, 14(2): 149-154. (in Chinese)
- [13] 张志良. *植物生理实验指导*. 北京: 高等教育出版社, 1992: 88-93.  
Zhang Z L. *Laboratory Guilds of Plant Physiology*. Beijing: Higher Education Press, 1992: 88-93. (in Chinese)
- [14] Moll R H, Kamprath E J, Jackson W A. Analysis and interpretation of factor which contribute to efficiency of nitrogen utilization. *Agronomy Journal*, 1982, 74: 562-564.
- [15] Stamp P, Chowchong S, Menzy M. Increase in the yield cytoplasm male-sterile maize revisited. *Crop Science*, 2000, 40: 1586-1587.
- [16] 李从锋, 刘 鹏, 王空军, 张吉旺, 董树亭. 缺氮对细胞质雄性不育玉米产量和光合特性的影响. *作物学报*, 2008, 34(4): 684-689.  
Li C F, Liu P, Wang K J, Zhang J W, Dong S T. Effect of nitrogen deficiency on yield and photosynthetic traits of cytoplasmic male sterility maize. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(4): 684-689. (in Chinese)
- [17] Macky A D, Barber S A. Effect of nitrogen on growth of two genotypes in the field. *Agronomy Journal*, 1986, 77: 699-703.
- [18] 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. *作物学报*, 1988, 14(4): 310-314.  
Dai J Y, E Y J, Gu W L. Study on the relationship between root growth and yield in maize (*Zea mays* L.) II. The interaction of root system and leaves of maize and its relation with yield. *Acta*

- Agronomica Sinica*, 1988, 14(4): 310-314. (in Chinese)
- [19] Bahman E, Jerry W. Maranville root development and nitrogen influx of corn genotypes grown under combined drought and N stress. *Agronomy Journal*, 1993, 85: 147-152.
- [20] Rajcan I, Tollenaar M. Source-sink ratio and leaf senescence in maize. I. Dry matter accumulation and partitioning during the grain-filling period. *Field Crops Research*, 1999, 60: 245-253.
- [21] Borrás L, Curá J A, Otegui M E. Maize kernel composition and post-flowering source-sink ratio. *Crop Science*, 2002, 42: 781-790.
- [22] Young K J, Long S P. Crop ecosystem responses to climatic change: maize and sorghum. In: Reddy K R & Hodges H F. (eds.) *Climate Change and Global Crop Productivity*. Wallingford: CABI Publishing, 2000: 107-131.
- [23] 巨晓棠, 张福锁. 关于氮肥利用率的思考. *生态环境*, 2003, 12(2): 192-197.
- Ju X T, Zhang F S. Thinking about nitrogen recovery rate. *Ecology and Environment*, 2003, 12(2): 192-197. (in Chinese)
- [24] 杨新泉, 冯 锋, 宋长青, 冷疏影. 主要农田生态系统氮素行为与氮肥高效利用研究. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(3): 373-376.
- Yang X Q, Feng F, Sun C Q, Leng S Y. Fate and efficient use of nitrogen fertilizer in main agroecosystems. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9(3): 373-376. (in Chinese)
- [25] 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(3): 248-254.
- Liu J A, Mi G H, Zhang F S. Difference in nitrogen efficiency among maize genotypes. *Journal of Agriculture Biotechnology*, 1999, 7(3): 248-254. (in Chinese)
- [26] 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. *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. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(5): 615-619. (in Chinese)

(责任编辑 郭银巧)