

赵京考, 张鑫, 吴德亮, 等. 不同氮肥形式对玉米产量、土壤无机氮的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(10): 52–56.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.10.014

不同氮肥形式对玉米产量、土壤无机氮的影响

赵京考¹, 张鑫¹, 吴德亮¹, 仝利朋¹, 李莎¹, 梁元振²

(1. 东北农业大学资源环境学院, 黑龙江哈尔滨 150030; 2. 东北农业大学工程学院, 黑龙江哈尔滨 150030)

摘要:比较同等氮素用量 156 kg/hm² 条件下不同施氮方式对玉米产量的影响, 结果表明, 同等施氮用量条件下, 以树脂包膜尿素(CRF2)的玉米产量相对最高, 其他处理玉米产量由高到低依次为 50% 尿素 + 50% 包膜尿素(CRF3) > 普通尿素 2 次施用(CCF2) > 普通尿素 1 次施用(CCF1) > 硫包膜尿素 1 次施用(CRF1)。以树脂包膜尿素为最佳施氮方案, 比较不同施氮方式的氮素释放特征, 结果表明, 玉米苗期、拔节期、抽雄期、成熟期时 0~30 cm 土壤的铵态氮含量由高到低分别为 CCF1 > CRF3 > CRF1 > CCF2 > CRF2、CCF2 > CCF1 > CRF2 > CRF3 > CRF1、CRF2 > CRF3 > CCF2 > CRF1 > CCF2 > CCF1; 0~30 cm 土壤的硝态氮含量由高到低分别为 CCF1 > CRF3 > CRF1 > CCF2 > CRF2、CCF2 > CCF1 > CRF2 > CRF3 > CRF3 > CCF2 > CRF1 ≈ CCF1 > CRF2、CCF2 > CRF1 > CRF3 > CCF1 ≈ CRF2。

关键词:玉米; 产量; 氮素; 硝态氮; 铵态氮; 无机氮

中图分类号: S147.35; S513.06

文献标志码: A

文章编号: 1002-1302(2017)10-0052-04

玉米对氮素的吸收与氮素供给之间的关系是确定氮素施肥措施的主要依据^[1-2], 而玉米高产、氮素低损失是氮肥施用追求的主要目标, 因此, 须改善玉米的生长环境, 增强玉米对养分的吸收能力^[3]。目前, 在黑龙江省南部地区, 玉米产量潜在在 8~10 t/hm², 而常规的耕作措施是化学除草加“两铲一耩”的除草方式, 加上基肥按 40% 氮肥总量、拔节期按 60% 氮肥总量、磷钾肥随基肥一次性施入的施肥模式^[4-5]。在这种施肥模式下, 氮素的当季利用率在 5%~60% 之间^[6], 而氮在土壤中的释放、作物吸收和损失仍存在诸多疑问^[7]。

氮挥发与硝态氮的淋失是氮素损失的主要途径^[8-9]。在作物生长早期, 施用尿素产生的铵态氮挥发量可高达总施氮量的 27%^[10], 而通过改变施肥方式、氮肥缓释化处理可显著降低铵态氮的挥发量^[11]。有研究表明, 氮肥撒施加翻耕施肥方式的氮挥发量小于条施, 而包膜氮肥的氮挥发量仅为施氮量的 4%, 远远小于普通尿素的铵态氮损失量。铵态氮对作物与环境的影响还表现在铵态氮向硝态氮的转化, 后者是作物氮素吸收的主要形式之一, 同时也是潜在的环境污染物, 硝态氮会从土壤中淋失到地下水中^[9]。将氮肥颗粒包被 1 层具有一定强度的化学材料, 可不同程度地改变氮素的释放形式^[12-13]。氮肥(尿素)颗粒包膜材料主要分为硫包膜和树脂包膜 2 大类, 具有一定的半透性。包膜尿素施入土壤, 在化学梯度作用下, 土壤中的水分通过半透膜被吸收到尿素颗粒内形成尿素溶液, 尿素分子从颗粒内部向土壤中缓慢释放。包膜尿素颗粒的释放与环境温度、湿度密切相关, 随环境温度、

湿度的增加而加快, 这与作物的需氮形式近似^[2]。

包膜尿素在提高作物产量、降低氮素损失上的表现差异较大, 对玉米的增产效应并不明显^[7]。黑土质地黏重, 具有较好的保肥能力, 而玉米在整个生育期面临着较为明显的氮素损失风险^[5]。研究黑土区包膜尿素对玉米的增产效应和氮素释放规律, 不仅可以优化包膜尿素的施用方法, 改进施肥效果, 而且还可以找出现有氮肥施肥方法的不足, 改进现有的施肥方法。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于黑龙江省哈尔滨市阿城区东北农业大学试验基地, 地理位置 127°3.1' E, 45°31'11.6" N, 海拔 144 m, 是黑龙江省玉米主产区。试验地属寒温带, 冬季漫长、春秋季短, 3 月份开始化冻, 年活动积温在 2 200~2 800 °C, 年均降水量为 520 mm(图 1), 雨热同季; 土壤为典型黑土, 耕层土壤有机质、全氮含量分别为 29.8、1.47 g/kg, 碱解氮、有效磷、有效钾含量分别为 125.0、29.1、122.5 mg/kg, pH 值为 6.11, 土壤容重为 1.23 g/cm³。玉米播种期一般为 4 月下旬到 5 月 10 日前, 生长期为 5—9 月。

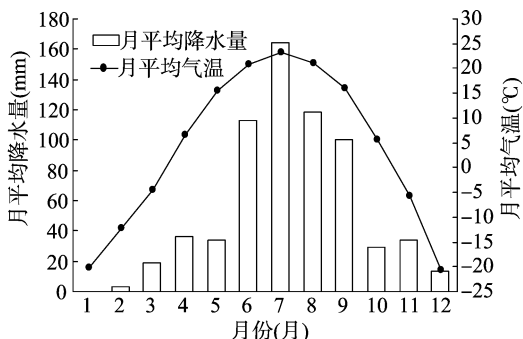


图1 试验区月平均降水量与月平均气温

收稿日期: 2016-11-25

基金项目: 国家重点研发计划(编号: 2016YFD0300204)。

作者简介: 赵京考(1965—), 男, 河北邢台人, 博士, 副教授, 从事作物水肥耦合研究。Tel: (0451)51664563; E-mail: jkzhaon@163.com。

通信作者: 张鑫, 硕士研究生, 从事作物水肥耦合研究。E-mail: 583038491@qq.com。

1.2 试验设计

根据施肥用量和方式不同,试验共设 6 个处理(表 1),除 CCF2 处理 40% 氮肥总量作基肥、60% 氮肥总量在玉米拔节时作追肥外,其他处理氮肥均与磷钾肥作为基肥一次性施入, P_2O_5 、 K_2O 用量均分别为 72、60 kg/hm²。每试验小区面积为 40 m²,完全随机区组排列,重复 4 次。处理 CRF3 中,树脂包膜尿素、普通尿素各占总施氮量的 50%。供试玉米品种为巴玉 11,于 2014 年 5 月 8 日采用机械播种,人工开沟施肥。每小区等行距种植 4 垄,垄宽 66.7 cm、长 15 m。基肥施在垄的两侧以避免烧苗,中耕、除草、病虫害防治等田间管理措施同常规大田。

表 1 试验区各施肥处理施肥量

编号	处理	氮素用量 (kg/hm ²)	施肥方式
CK	空白	0	无
CCF1	普通尿素	156	基施
CCF2	普通尿素	156	40% 基施,60% 追肥
CRF1	硫包膜尿素	156	基施
CRF2	树脂包膜尿素	156	基施
CRF3	50% 树脂包膜 + 50% 普通尿素	156	基施

1.3 采样时间与测定内容

于玉米苗期(6 月 13 日)、拔节期(7 月 6 日)、抽雄期(7 月 24)、成熟期(10 月 9 日)分别采集深度为 0~30、30~60、60~90 cm 的新鲜土壤,室内测定其含水量;用 2 mol/L KCl 溶液浸提,用 A33 型流动注射分析仪测定新鲜土壤中硝态氮、铵态氮含量,并通过含水量换算成风干土中的硝态氮、铵态氮含量。2014 年 10 月 16 日收获,并考种测产。

1.4 数据处理与分析

采用 SPSS 17.0、Excel 2007 软件对数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同施氮方式对玉米产量的影响

由表 2 可见,不同施氮处理的玉米产量由高到低依次为单纯施用树脂包膜尿素(CRF2) > 50% 尿素 + 50% 包膜尿素(CRF3) > 普通尿素 2 次施用(CCF2) > 普通尿素一次性施用(CCF1) > 硫包膜尿素一次性施用(CRF1) > 不施肥(CK),其中处理 CRF2 的玉米产量相对最高,为 12.398 t/hm²,与 CRF3 处理差异不显著,与其他处理差异极显著;处理 CRF3 与处理 CCF2、处理 CCF2 与处理 CCF1、处理 CCF1 与处理 CRF1 之间差异不显著;对照(不施肥)的玉米产量相对最低,为 8.475 t/hm²,极显著低于其他处理的玉米产量。这说明氮素是玉米增产的关键因素,在单位面积施氮量相同的情况下,处理 CRF2 的玉米产量相对最高,这在一定程度上说明玉米对氮素的吸收量相对最高、失量相对最小,为最佳施肥方案。由表 3 可见,不同施氮处理对玉米产量具有极显著的影响。

2.2 不同施氮处理对玉米不同时期不同深度土壤铵态氮含量的影响

由图 2 可见,30~60、60~90 cm 2 个深度土壤各处理的铵态氮含量除苗期到拔节期有明显降低外,拔节期到成熟期变化不大,故仅对玉米不同时期 0~30 cm 深度土壤的铵态氮

表 2 不同施氮方式对玉米产量的影响

处理	产量 (t/hm ²)	差异显著性	
		0.05	0.01
CRF2	12.398	a	A
CRF3	11.760	ab	AB
CCF2	10.979	bc	BC
CCF1	10.664	cd	BC
CRF1	9.907	d	C
CK	8.475	e	D

注:同列数据后不同大写、小写字母分别表示差异极显著($P < 0.01$)、显著($P < 0.05$)。

表 3 施氮方式对产量影响的方差分析

变异来源	平方和	自由度	均方差	F 值	$F_{0.05}$	$F_{0.01}$
处理	38.671	5	7.734	18.989 **	2.90	4.56
区组	4.076	3	1.359	3.336 *	3.29	5.42
误差	6.109	15	0.407			
总和	48.856	23				

注:“*”“**”“ns”分别表示差异显著、极显著、不显著。表 4 同。

含量进行比较。

由图 2-A 可见,在玉米苗期,0~30 cm 土壤的铵态氮含量由高到低依次为 CCF1 > CRF3 > CRF1 > CCF2 > CRF2 > CK,其中普通尿素一次性施入时铵态氮的释放相对最快,土壤中的铵态氮含量相对最高;50% 树脂包膜尿素 + 50% 普通尿素(CRF3)处理的土壤铵态氮含量略低于 CCF1 处理;硫包膜尿素处理(CRF1)的土壤铵态氮含量低于处理 CRF3,而稍高于处理 CCF2;除 CK 外,树脂包膜尿素处理(CRF2)的铵态氮含量相对较低。这说明改变苗期施肥方式,可有效降低耕层土壤的铵离子含量。玉米拔节期是对氮素的吸收高峰期,适当提高铵离子含量会对玉米的生长有利。由图 2-B 可见,在玉米拔节期,0~30 cm 土壤的铵态氮含量由高到低依次为 CCF2 > CCF1 > CRF2 > CRF3 > CRF1 > CK,其中尿素分 2 次施肥处理(CCF2)的铵态氮含量相对最高,追肥可能是造成铵离子含量急剧增加的主要因素;处理 CCF1 也使土壤的铵离子含量较高。由图 2-C 可见,在玉米抽雄期,0~30 cm 土壤的铵态氮含量由高到低依次为 CRF2 > CRF3 > CCF2 > CRF1 > CCF1 > CK,说明此时树脂包膜尿素处理(CRF2)的铵离子供给能力相对最强,其次是 50% 尿素 + 50% 树脂包膜尿素处理(CRF3),尿素分 2 次施入处理(CCF2)仍具有较高的铵离子供给能力。由图 2-D 可见,在玉米成熟期,与玉米其他 3 个时期相比,各个施氮处理的铵态氮含量基本降到最低,0~30 cm 土壤铵态氮含量由高到低依次为 CRF2 > CRF3 > CRF1 > CCF2 > CK > CCF1,其中树脂包膜尿素处理的铵态氮含量相对最高,其次是 50% 尿素 + 50% 树脂包膜尿素处理(CRF3)^[14],硫包膜尿素处理次之。

2.3 不同施氮处理对玉米不同时期不同深度土壤硝态氮含量的影响

由图 3 可见,玉米苗期各处理 0~30 cm 土层土壤的硝态氮含量相对最高;抽雄期 30~60、60~90 cm 土层土壤的硝态氮含量大多高于拔节期,说明从拔节期到抽雄期,土壤中的硝态氮随水体向下淋洗;玉米成熟期与抽雄期相比,各个土层土

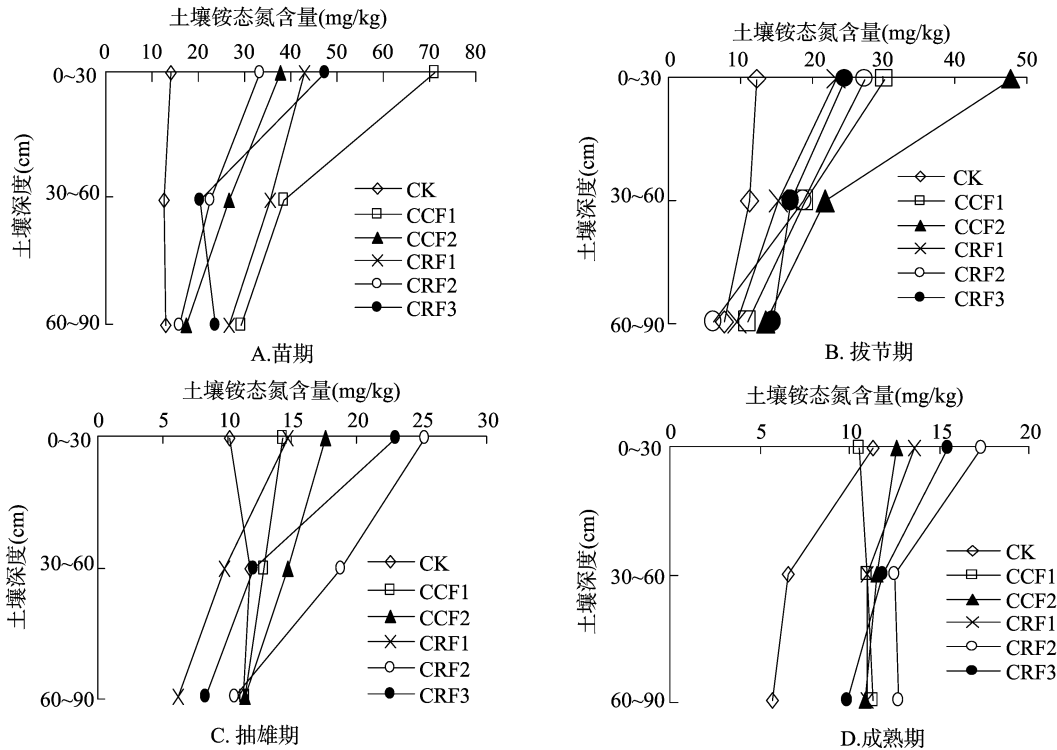


图2 玉米不同发育时期不同深度土层中的铵态氮含量

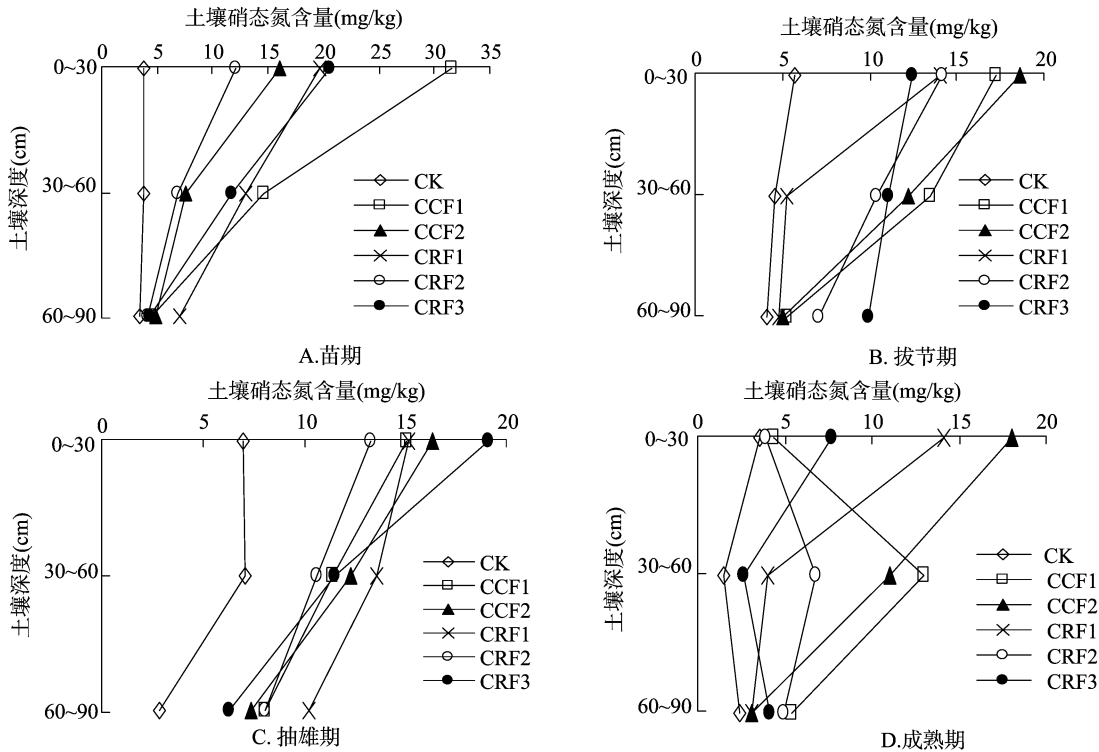


图3 玉米不同发育时期不同不同深度土层中的硝态氮含量

壤的硝态氮含量大多有不同程度的下降,说明土壤中一部分硝态氮被植物吸收利用,一部分被淋洗损失;不同处理 0 ~ 30 cm 土层土壤的硝态氮含量大致顺序为苗期 > 拔节期 > 抽雄期 > 成熟期,且施氮处理明显高于对照,这说明施入氮肥后,有相当数量的氮素从尿素转变为铵态氮,并又转化为硝

态氮。
由图 3 - A 可见,在玉米苗期,0 ~ 30 cm 土壤的硝态氮含量由高到低依次为 CCF1 > CRF3 > CRF1 > CCF2 > CRF2 > CK,其中普通尿素一次性施肥处理 (CCF1) 的土壤硝态氮含量相对最高,其次是 50% 尿素 + 50% 树脂包膜尿素一次性施

肥(CRF3);传统的施氮方式即处理 CCF2,其硝态氮含量仅略高于树脂包膜尿素一次性施氮(CRF2);硝态氮含量最低的为对照,即不施氮肥,此硝态氮可能来自于前茬土壤的残余氮。由图 3-B 可见,在玉米拔节期,0~30 cm 土壤的硝态氮含量由高到低依次为 CCF2>CCF1>CRF2>CRF1>CRF3>CK,处理 CCF2 土壤的硝态氮含量相对最高,这可能是拔节期追施 60% 氮肥的缘故;处理 CRF2 土壤的硝态氮含量次于处理 CCF2、CCF1,说明处理 CRF2 可以供给作物较多的氮素。由图 3-C 可见,在玉米抽雄期,0~30 cm 土壤的硝态氮含量由高到低依次为 CRF3>CCF2>CRF1≈CCF1>CRF2>CK,其中,处理 CRF3 土壤的硝态氮含量相对最高,其次是处理 CCF2;处理 CRF1、CCF1 土壤的硝态氮含量基本相当,处理 CRF2 土壤的硝态氮含量低于处理 CRF1、CCF1 而高于不施肥处理,说明树脂包膜尿素一次性施肥在抽雄期释放的硝态氮水平较低。由图 3-D 可见,在玉米成熟期,0~30 cm 土壤的硝态氮含量由高到低依次为 CCF2>CRF1>CRF3>

CCF1≈CRF2≈CK,其中处理 CRF2 土壤的硝态氮含量相对较低,说明树脂包膜尿素处理(CRF2)能在玉米生长后期降低表层土壤中硝态氮含量;处理 CCF1 0~30 cm 土壤的硝态氮含量相对较低,而 30~60 cm 土壤的硝态氮含量相对较高,这可能是大量硝态氮淋洗到深层土壤的缘故。

2.4 玉米不同生育时期、土层深度和处理对土壤铵态氮、硝态氮影响的方差分析

在土壤中,尿素中的酰胺态氮会在脲酶的作用下转化为铵态氮,进一步在细菌的作用下转化为硝态氮。铵态氮和硝态氮是作物吸收氮素的主要形式,而硝态氮还是造成环境污染的主要物质,二者在土壤中的变化反映了土壤氮素的供给状态。由表 4 可见,玉米生育时期、土层深度、施氮方式对铵态氮、硝态氮的影响均达到极显著水平;玉米生育时期对铵态氮的影响远高于硝态氮;土层深度对 2 种氮素的影响较大,对硝态氮的影响略低于铵态氮;玉米生育时期与土层深度、生育时期与施氮方式互作对土壤铵态氮的影响达到极显著水平。

表 4 玉米不同生育时期、土层深度、对施氮方式对土壤铵态氮、硝态氮含量影响的方差分析结果

变异来源	因变量	平方和	自由度	均方差	F 值	$F_{0.05}$	$F_{0.01}$
生育时期	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	14 800.708	3	4 933.569	56.393 **	2.70	3.98
	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	943.865	3	314.622	7.707 **	2.70	3.98
土层深度	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	7 132.475	2	3 566.238	40.764 **	3.09	4.82
	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	3 109.218	2	1 554.609	38.082 **	3.09	4.82
施氮方式	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	4 159.031	5	831.806	9.508 **	2.30	3.20
	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	1 880.969	5	376.194	9.215 **	2.30	3.20
生育时期×土层深度	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	2 336.622	6	389.437	4.451 **	2.19	2.99
	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	422.706	6	70.451	1.726ns	2.19	2.99
深度×施氮方式	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	1 240.421	10	124.042	1.418ns	1.92	2.51
	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	730.118	10	73.012	1.788ns	1.92	2.51
生育时期×施氮方式	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	6 583.357	15	438.890	5.017 **	1.79	2.26
	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	775.591	15	51.706	1.267ns	1.79	2.26
生育时期×土层深度×施氮方式	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	2 866.827	30	95.561	1.092ns	1.57	1.89
	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	1 247.315	30	41.577	1.018ns	1.57	1.89
区组	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	71.835	3	23.945	0.274ns	2.70	3.98
	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	176.524	3	58.841	1.441ns	2.70	3.98
误差	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	18 634.544	213	87.486			
	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	8 589.963	213	40.328			
总和	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	57 825.819	287				
	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	17 876.267	287				

3 结论与讨论

在不同施氮方式下,玉米产量差异明显,树脂包膜尿素、与树脂包膜尿素处理相关的施氮方式均对玉米有较好的增产趋势。然而,树脂包膜尿素处理与传统的分次施氮相比,增产没有显著性差异。玉米高产的氮释放特点是在生长前期即苗期与拔节期,土壤铵态氮处于较低水平;随生育期的推进,铵态氮释放强度增强,处于相对较高水平。因此,前期控制氮素的释放是增加后期氮供给的重要调控手段,而具备这一调控特征的施氮处理主要有 3 个,即树脂包膜尿素播种时期一次性施入处理、50% 尿素+50% 树脂包膜尿素播种时一次性施入处理、40% 尿素播种时施入+60% 尿素拔节期追肥处理。可见,树脂包膜尿素与传统的施氮方式相比,优势并不明显。对硝态氮来说,其变化规律与铵态氮基本相似,在玉米生育前期,土壤硝态氮含量相对较低,随生育期的推进,硝态氮含量

略有增加,在成熟期突降,各处理的硝态氮含量多处于较低水平,这反映树脂包膜尿素在增加后期土壤铵态氮含量的同时,土壤硝态氮水平并没有增加,使土壤硝态氮含量保持在环境友好水平。

参考文献:

- [1] Nelson K A, Motavalli P P, Dudenhoefler C J. Cropping system affects polymer-coated urea release and corn yield response in claypan soils [J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2014, 200(1): 54-65.
- [2] Hatfield J L, Parkin T B. Enhanced efficiency fertilizers: effect on agronomic performance of corn in Iowa [J]. Agronomy Journal, 2014, 106(2): 771-780.
- [3] Nash P R, Nelson K A, Motavalli P P. Corn yield response to timing of strip-tillage and nitrogen source applications [J]. Agronomy Journal, 2013, 105(3): 623-630.
- [4] 赵京考, 卢静, 谷思玉, 等. 降雨量和氮素对黑土区春玉米产量

曹晋军,刘永忠,李万星,等.超前去雄携带叶片数对玉米光合特性及生长的影响[J].江苏农业科学,2017,45(10):56-58.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.10.015

超前去雄携带叶片数对玉米光合特性及生长的影响

曹晋军,刘永忠,李万星,靳鲲鹏,李 丹

(山西省农业科学院谷子研究所,山西长治 046011)

摘要:研究了超前去雄携带叶片数量对玉米光合特性及生长的影响,为提高玉米产量提供参考。试验品种郑单 958,种植密度 90 000 株/hm²,当能摸到雄穗苞叶内穗苞时去雄,每 2 d 隔 1 行去 2 行雄穗,雄穗完全抽出时停止,统计每个处理平均携带叶片数,设有 3.2、2.8、2.6、1.6、0.5 片叶 5 个处理,以不去雄为对照。结果表明,与对照相比,携带 2.8 片叶的处理,完熟期穗位叶 SPAD 值增加了 16.7%;在灌浆期穗位叶净光合速率增加了 5.2%;平均灌浆速率增加了 5.6%,最大灌浆速率增加了 6.0%,灌浆最大活跃期延长 3.9 d;穗干质量增加了 25.4%,单株干质量增加了 11.1%;百粒质量为 32.32 g,比对照增加了 10.6%,产量为 14 879.10 kg/hm²,比对照增加了 21.6%。

关键词:超前去雄;玉米;净光合速率;灌浆速率;产量

中图分类号:S513.04 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2017)10-0056-03

种植密度是玉米高产的决定因素之一,但随着种植密度的不断提高,植株之间相互遮蔽,群体郁闭,通风透光条件变差,依靠继续增大密度来提高产量的空间越来越小。去雄是提高玉米产量的简便途径,有研究表明,玉米栽培群体中花粉的供应量大大超过实际需求,雄穗保留 4%~6.7% 即可满足花粉需求^[1-2]。玉米雄穗在产量形成的总变异中的作用可达 37.4%,是进一步提高产量的一个不容忽视的相关因子^[3]。由于玉米植株高大,雄穗完全抽出后再进行去雄不易操作,因此,进行超前去雄更适宜大田作业。目前摸苞带叶超前去雄在制种玉米田有较多研究,但在大田玉米中研究较少,本研究从穗位叶叶绿素含量、光合速率、灌浆速率、干物质分配等方面入手研究,以期阐明超前去雄携带的叶片数对玉米

产量的影响。

1 材料与方法

1.1 试验地基本情况

试验于山西省农业科学院谷子研究所试验基地进行。试验地为壤土,0~40 cm 土层内的有机质含量为 21.60 g/kg,全氮 1.28 g/kg,碱解氮 55.13 mg/kg,速效磷 14.36 mg/kg,速效钾 204.01 mg/kg。

1.2 试验设计

供试品种为郑单 958,2015 年 4 月 27 日播种,9 月 30 日收获。密度 90 000 株/hm²,小区行长 6 m,共 15 行,行距 50 cm,小区面积 45 m²,随机区组排列,3 次重复。当能摸到雄穗苞叶内穗苞时超前去雄,分别于 7 月 5 日、7 月 7 日、7 月 9 日、7 月 11 日、7 月 13 日隔 1 行去 2 行雄穗,雄穗完全抽出时停止去雄,每个处理去掉的总叶片数除以去雄株数得到平均携带叶片数,分别为 3.2、2.8、2.6、1.6、0.5 片叶,对照为不去雄,共 6 个处理。

1.3 测定项目

1.3.1 穗位叶叶绿素含量 SPAD 值测定:采用 SPAD-502

收稿日期:2016-10-28

基金项目:山西省重点研发计划项目(编号:201603D221035-3);山西省农业科学院重点项目(编号:YZD1503)。

作者简介:曹晋军(1981—),男,山西长治人,硕士,助理研究员,主要从事玉米栽培研究及推广工作。E-mail:gzscj@163.com。

通信作者:刘永忠,硕士,研究员,主要从事大豆育种、玉米栽培研究及推广工作。Tel:(0355)2204235;E-mail:kblyz@163.com。

的影响[J]. 农业工程学报,2011,27(12):74-78.

[5]王振华,张 林.黑龙江省松嫩平原中南部玉米生产限制因素及对策[J]. 玉米科学,2008,16(5):147-149.

[6]王 端,纪德智,马 琳,等.春玉米产量和施氮量对氮素利用率的影响[J]. 中国土壤与肥料,2013(6):42-46.

[7]Hatfield J L, Venterea R T. Enhanced efficiency fertilizers: a multi-site comparison of the effects on nitrous oxide emissions and agronomic performance[J]. Agronomy Journal, 2014, 106(2): 679-680.

[8]Rochette P, Angers D A, Chantigny M H, et al. Ammonia volatilization and nitrogen retention: how deep to incorporate urea? [J]. Journal of Environmental Quality, 2013, 42(6): 1635-1642.

[9]Maharjan B, Venterea R T, Rosen C. Fertilizer and irrigation management effects on nitrous oxide emissions and nitrate leaching[J]. Agronomy Journal, 2014, 106(2): 703-714.

[10]Rochette P, Macdonald J D, Angers D A, et al. Banding of urea increased ammonia volatilization in a dry acidic soil[J]. Journal of Environmental Quality, 2009, 38(4): 1383-1390.

[11]Li N, Ning T Y, Cui Z Y, et al. N₂O emissions and yield in maize field fertilized with polymer-coated urea under subsoiling or rotary tillage[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2015, 102(3): 397-410.

[12]陈 润,张文辉.包膜型缓控释肥料的研究综述[J]. 化学工程与装备, 2010(10): 126-128.

[13]樊小林,刘 芳,廖照源,等.我国控释肥料研究的现状和展望[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(2): 463-473.

[14]纪德智,王 端,赵京考,等.不同氮肥形式对春玉米产量、土壤硝态氮及氮素利用率的影响[J]. 玉米科学, 2015, 23(2): 111-116.