

乙烯利和氮肥对玉米基部节间性状和抗折断力的调控研究

叶德练 王庆燕 张钰石 李建民 段留生 张明才* 李召虎

(中国农业大学 农学与生物技术学院,北京 100193)

摘要 在大田条件下,以郑单 958 为玉米材料,在华北平原研究了乙烯利(0 和 180 g/hm²)和氮肥水平(施氮量 0、150、225 和 300 kg/hm²)对玉米节间形态性状、化学成分和抗折断力的影响。结果表明:乙烯利显著提高基部节间最大直径、最小直径、单位节间长度干重和抗折断力,显著降低节间长度和干重。增施氮肥可以提高基部节间最大直径、最小直径、干重、单位节间长度干重和抗折断力,但是 N225 和 N300 处理之间差异不显著。乙烯利和氮肥均能显著提高各时期基部节间全氮含量。喷施乙烯利降低了成熟期基部节间纤维素和木质素含量;随着氮肥水平的提高,基部节间半纤维素、纤维素和木质素呈下降趋势。乙烯利和氮肥对 2012 年的节间直径、节间长度、干重和单位节间长度干重有互作效应,对成熟期节间全氮、半纤维素和纤维含量有互作效应。相关性分析可得,抗折断力与节间最大直径、最小直径、单位节间长度干重和全氮含量呈显著正相关,但是与节间长度、纤维素和木质素含量呈负相关。氮肥施用 225 kg/hm² 的基础上配合拔节期喷施 180 g/hm² 乙烯利可以塑造粗壮矮短的基部节间,有助于提高玉米的抗倒伏能力。

关键词 乙烯利;氮肥;玉米;节间性状;抗折断力

中图分类号 S 513 **文章编号** 1007-4333(2015)06-0001-08 **文献标志码** A

Study of ethephon and nitrogen rate in regulating the basal internode characteristics and breaking resistance of maize

YE De-lian, WANG Qing-yan, ZHANG Yu-shi, LI Jian-min,

DUAN Liu-sheng, ZHANG Ming-cai*, LI Zhao-hu

(College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract A field experiment using maize variety Zhengdan 958 was conducted to study the effect of ethephon (0 and 180 g/hm²) and nitrogen rate (0, 150, 225 and 300 kg/hm²) on morphological and chemical traits and breaking resistance of basal internode of maize. The results showed that ethephon significantly increased the basal internode maximum diameter, minimum diameter, dry weight per unit internode length and breaking resistance, but remarkably decreased the length and dry weight of basal internode. With the increasing of nitrogen rate, the maximum diameter, minimum diameter, dry weight, dry weight per unit internode length and breaking resistance of basal internode were increased accordingly. There was no significant difference between N225 and N300 treatment. Ethephon and N could increase nitrogen concentration of basal internode at different stages. Ethephon decreased the cellulose and lignin concentrations of basal internode at mature stage. And the hemicellulose, cellulose and lignin concentrations of basal internode were decreased with the increasing of N rate. There were significant effect of ethephon nitrogen combination for basal internode diameter, length, dry weight and dry weight per unit internode length in 2012, for nitrogen, hemicelluloses and cellulose concentrations at mature in 2011 and 2012. Through correlation analysis, breaking resistance was significantly positively correlated with maximum diameter, minimum diameter, dry weight per unit internode length and nitrogen concentration. However, it was negatively correlated with internode length, cellulose and

收稿日期: 2015-03-11

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAD16B15)

第一作者: 叶德练, 博士研究生, E-mail: ye-delian@163.com

通讯作者: 张明才, 副教授, 主要从事作物化学控制研究, E-mail: zmc1214@163.com

lignin concentrations. These results suggested that application of 225 kg/hm² nitrogen combined with 180 kg/hm² ethephon at elongation stage can create a thick, short and strong basal internode which contributed to improving lodging resistance of maize.

Key words ethephon; nitrogen; maize; internode characteristic; breaking resistance

倒伏导致玉米产量和品质下降,影响机械化采收^[1-2]。倒伏破坏冠层结构,影响光合作用,而且每增加2%的倒伏就会引起1%的减产^[3]。有研究表明,在华北平原30%~60%的玉米倒伏是茎折倒伏,而且茎折通常发生在基部第3~5节间^[2,4-5]。茎秆机械强度(抗折断力)是影响玉米倒伏的重要性状之一,因此提高玉米基部节间的机械强度对提高玉米抗倒伏能力至关重要。形态性状如株高、穗位高、基部节间长度和单位节间长度干重和机械强度关系密切^[6-7];而且,纤维素和木质素等结构性碳水化合物也可以影响抗倒伏能力^[8]。机械强度受内部和外部因素影响,通过遗传改良可以提高机械强度^[9],同样田间管理措施和环境因素也会影响节间机械性能。施用氮肥是增加玉米产量的重要田间管理措施,但是过量施氮不仅降低产量和氮肥利用效率,还导致茎秆机械强度减弱,提高倒伏风险^[10-11]。氮肥施用过量显著提高基部节间长度^[12],但是降低节间直径^[13]。一般而言,抗倒伏品种的纤维素和木质素含量更高。但是增施氮肥降低了纤维素和木质素含量,提高了氮含量,容易引起倒伏的发生^[13-14]。施用植物生长调节剂如乙烯利可以降低植株高度和穗位高,增加基部节间直径,是控制倒伏的有效措施^[15]。

华北平原是中国粮食的主产区,维持和提高该地区玉米产量是保障粮食安全的重要途径。而华北平原位于暖温带季风气候带,降雨量集中在7—8月,多风多雨的天气加剧了玉米倒伏的风险。但是在华北平原,乙烯利和氮肥调控玉米节间性状的研究鲜见报道。

本研究拟在华北平原研究乙烯利和氮肥对春播玉米节间形态性状、化学成分和抗折断力的影响,明确抗折断力与节间形态和化学性状的关系,阐明乙烯利和氮肥对玉米节间性状和抗倒伏的调控机制,以期为华北平原玉米高产增效节本栽培技术体系提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

本试验于2011—2012年在河北省沧州市吴桥

县中国农业大学吴桥实验站(37°41'N,116°37'E)开展。该地区属于温带季风气候,常年降雨量562 mm,主要分布在6—8月份。本地全年光照2 724.8 h,年平均气温12.9℃,无霜期201 d。2011年试验地0~20 cm土层主要理化性质如下:pH 8.3、有机质9.9 g/kg、全氮0.80 g/kg、有效磷30.7 mg/kg和速效钾147.7 mg/kg。

玉米品种选用郑单958,分别于2011年5月3日和2012年5月3日播种,0.6 m等行距种植,株距为0.27 m,并于当年的9月上旬收获。试验采用两因素完全随机区组设计,每个处理4个小区重复。乙烯利处理设置2个施用量,0和180 g/hm²(浓度分别为0和400 mg/L,分别用CK和E表示),乙烯利兑水量为450 L/hm²,在拔节期叶面均匀喷施乙烯利。氮肥处理设置4个施用量水平,空白、低氮、中氮和高氮,施氮量分别为0、150、225和300 kg/hm²(分别用N0、N150、N225和N300表示)。小区面积28.8 m²,2年小区位置保持不变。氮肥施用尿素(含氮46.4%),各处理的全部氮肥在播前施入各小区。磷钾肥分别施用P₂O₅(12%过磷酸钙)90 kg/hm²和K₂O(51%硫酸钾)90 kg/hm²,作为基肥一次施入全部小区。其他农艺措施参照当地作法。

1.2 取样及测定方法

有研究^[4]表明茎折主要发生在地上部第3~5节间,因此地上部第3伸长节间(即第9节间)的相关性状对研究提高其抗倒伏能力是很重要的。在玉米成熟期,每个处理收获5株有代表性的植株,切取第9节间(第9叶片对生的节间,即地上部第3伸长节间)以测定第9节间的相关形态性状。用游标卡尺测定第9节间的最大直径、最小直径和节间长,然后用茎秆强度仪(YD-1,浙江托普仪器有限公司,中国)测定节间抗折断力,接着80℃烘干至恒重称取节间干重。单位节间长度干重=节间干重/节间长度。

在玉米V₁₁、V₁₃、吐丝期和成熟期,切取玉米第9节间以测定节间的化学成分。节间样品80℃烘干后粉样,过0.25 mm筛以测定全氮含量,过1 mm筛以测定半纤维素、纤维素和木质素含量。用凯氏定氮法^[16]测定第9节间全氮含量,用范氏洗涤法^[17]

测定第 9 节间半纤维素、纤维素和木质素含量。

1.3 数据分析

采用 Microsoft Excel 2007 和 SAS 9.0 进行分析数据。

2 结果与分析

2.1 乙烯利及氮肥对玉米节间形态性状的影响

在 2011 和 2012 年, 喷施乙烯利可以显著提高

玉米第 9 节间的最大直径、最小直径、单位节间长度干重和抗折断力, 但显著降低第 9 节间的干重和节间长(表 1)。随着氮肥水平的提高, 最大直径、最小直径、干重、单位节间长度干重和抗折断力随之增大, 但是 N225 和 N300 处理之间差异不显著。在 2011 年, 与 NO 相比, N225 处理下最大直径和抗折断力分别提高了 26.0% 和 51.5%; 在 2012 年, 与 NO 相比, N225 处理下最大直径和抗折断力分别提

表 1 乙烯利和氮肥对玉米基部节间形态性状的影响

Table 1 Effect of ethephon and nitrogen rate on morphology-related traits of spring maize basal internode

2011 年玉米性状 Maize properties in 2011							
处理因素 Treatment factor	处理水平 Treatment level	最大直径/mm	最小直径/mm	节间长/mm	干重/g	单位节间长度 干重/(g/cm)	抗折 断力/N Breaking resistance
		Maximum diameter	Minimum diameter	Internode length	Dry weight	Dry weight per unit internode length	
乙烯利 Ethephon (E)	对照 CK	24.9 b	19.8 b	77.0 a	3.57 a	0.469 b	362 b
	乙烯利 E	26.8 a	21.6 a	43.2 b	2.45 b	0.562 a	441 a
氮肥 Nitrogen rate (N)	空白 N0	23.5 c	18.7 c	61.1 a	2.39 b	0.410 b	307 c
	低氮 N150	25.5 b	20.1 b	59.6 a	2.92 ab	0.507 a	370 b
	中氮 N225	27.0 a	22.0 a	58.6 a	3.30 a	0.573 a	465 a
	高氮 N300	27.4 a	22.0 a	61.1 a	3.43 a	0.572 a	464 a
变异来源 Sources of variation	乙烯利 E	***	***	***	***	***	***
	氮肥 N	***	***	NS	**	***	***
	乙烯利×氮肥 E×N	NS	NS	NS	NS	NS	NS
2012 年玉米性状 Maize properties in 2012							
处理因素 Treatment factor	处理水平 Treatment level	最大直径/mm	最小直径/mm	节间长/mm	干重/g	单位节间长度 干重/(g/cm)	抗折 断力/N Breaking resistance
		Maximum diameter	Minimum diameter	Internode length	Dry weight	Dry weight per unit internode length	
乙烯利 Ethephon (E)	对照 CK	26.4 b	20.8 b	79.6 a	3.83 a	0.481 b	377 b
	乙烯利 E	28.2 a	23.5 a	41.8 b	2.31 b	0.557 a	431 a
氮肥 Nitrogen rate (N)	空白 N0	25.1 c	20.8 c	62.9 a	2.53 c	0.420 c	355 b
	低氮 N150	27.5 b	21.9 b	60.9 ab	3.01 b	0.499 b	382 b
	中氮 N225	28.2 a	23.0 a	59.5 b	3.35 a	0.579 a	439 a
	高氮 N300	28.5 a	23.1 a	59.5 b	3.39 a	0.577 a	439 a
变异来源 Sources of variation	乙烯利 E	***	***	***	***	***	***
	氮肥 N	***	***	NS	***	***	***
	乙烯利×氮肥 E×N	*	***	**	***	*	NS

注: 同一列中不同小写字母表示在 5% 水平上差异显著。*, ** 和 *** 分别表示在 5%, 1% 和 1% 水平差异显著, NS 表示差异不显著。下同。

Note: Different letters within a column are significantly different at $P < 0.05$. *, ** and *** different significant at $P < 0.05, 0.01$ and 0.001 , respectively. NS indicates no significant difference. The same as follows.

高了12.4%和23.7%。乙烯利和氮肥对2011年各形态相关性状没有互作效应,对2012年的节间最大直径、最小直径、节间长、干重和单位节间长度干重均有显著的互作效应,但抗折断力没有互作效应。

2.2 乙烯利及氮肥对玉米节间全氮含量的影响

从 V_{11} ~成熟期,玉米第9节间全氮含量随着生育时期的推移呈现下降的趋势(表2)。乙烯利可以显著提高各个生育时期节间的全氮含量(除了

2011年 V_{11}),其中在2011和2012年的成熟期,乙烯利处理下的节间全氮含量较对照的分别增加45.0%和10.6%。增施氮肥有利于提高节间全氮含量。但在2011年的 V_{11} 、 V_{14} 和成熟期,N300与N225处理之间的全氮含量差异不显著,而2012年,各时期的节间全氮含量出现 $N300 > N225 > N150 > N0$ 的趋势,且各处理之间差异显著(除 V_{11})。乙烯利和氮肥对各生育时期玉米节间全氮含量均存在显著的互作效应。

表2 乙烯利和氮肥对玉米节间氮含量的影响

Table 2 Effect of ethephon and nitrogen rate on nitrogen concentration of spring maize internode mg/g

处理因素 Treatment factor	处理水平 Treatment level	2011年玉米生长期 Maize growth period in 2011				2012年玉米生长期 Maize growth period in 2012			
		11展叶 V_{11}	13展叶 V_{13}	吐丝期 Silking	成熟期 Harvest	11展叶 V_{11}	13展叶 V_{13}	吐丝期 Silking	成熟期 Harvest
		乙烯利 Ethephon (E)	对照 CK	28.5 a	15.5 b	13.8 b	8.0 b	15.5 b	14.7 b
	乙烯利 E	28.1 a	18.4 a	15.6 a	11.6 a	16.4 a	16.4 a	9.5 a	5.2 a
氮肥 Nitrogen rate (N)	空白 N0	27.8 b	14.9 c	13.5 c	8.1 c	10.6 c	9.1 d	4.3 c	2.7 d
	低氮 N150	27.8 b	16.2 b	13.7 c	9.7 b	17.1 b	16.3 c	8.7 b	4.7 c
	中氮 N225	28.4 ab	18.2 a	15.0 b	10.7 a	17.5 b	17.4 b	9.1 b	5.9 b
	高氮 N300	29.2 a	18.4 a	16.6 a	10.8 a	18.6 a	19.4 a	12.2 a	6.6 a
变异来源 Sources of variation	乙烯利 E	NS	***	***	***	***	***	***	*
	氮肥 N	**	***	***	***	***	***	***	***
	乙烯利×氮肥 E×N	***	**	***	*	***	***	**	***

2.3 乙烯利及氮肥对玉米节间结构性碳水化合物含量的影响

2.3.1 乙烯利及氮肥对玉米节间半纤维素含量的影响

2011年,乙烯利处理可以提高 V_{11} 和 V_{13} 时期玉米节间半纤维素含量,但是显著减低吐丝期和成熟期节间半纤维素含量(表3)。2012年,喷施乙烯利明显提高了各时期节间半纤维素含量,其中在成熟期,乙烯利处理节间半纤维素含量比对照提高了9.9%。随着施氮量的增加,节间半纤维素含量呈下降的趋势,但在成熟期其含量在各氮肥水平下差异不显著。除了2012年的 V_{13} 和吐丝期,乙烯利和氮肥对各时期节间半纤维素含量互作效应显著。

2.3.2 乙烯利和氮肥对玉米节间纤维素含量的影响

乙烯利提高了2011年 V_{11} 和 V_{13} 期节间纤维素含量,但是降低了吐丝期和成熟期的纤维素含量。在2012年前期乙烯利处理节间纤维素含量显著下

降,而后期这种效应不显著(表4)。其中与对照相比, V_{13} 期乙烯利降低了5.3%节间纤维素含量,而成熟期仅降低了1.2%。节间纤维素含量随着氮肥水平的提高而降低,在2011年的吐丝和成熟期,N150处理下其纤维素含量最高,而2012年的 V_{13} ~成熟期,N0处理下节间纤维素含量最高。在2011年,除了成熟期,乙烯利和氮肥对节间纤维素含量没有互作效应,而在2012年,乙烯利和氮肥对各时期的节间纤维素含量互作效应显著。

2.3.3 乙烯利及氮肥对玉米节间木质素含量的影响

节间木质素含量随着生育期呈先增加,到吐丝期达到峰值,然后下降的趋势(表5)。2011年,乙烯利对节间木质素含量影响不大,但是在2012年,乙烯利处理降低了木质素含量,其中 V_{13} 和吐丝期达到显著差异,而成熟期差异不显著。除了2011年的 V_{13} 时期,增施氮肥对节间木质素含量影响不显著,但是在2011和2012年的成熟期,木质素含量随着

施氮量的增加而下降,其中 N300 处理下的木质素含量较 N0 处理的分别降低了 23.5% 和 31.9%。

除了 2012 年的 V₁₁ 和成熟期,乙烯利和氮肥在节间木质素含量上没有互作效应。

表 3 乙烯利和氮肥对玉米节间半纤维素含量的影响

Table 3 Effect of ethephon and nitrogen rate on hemicellulose concentration of spring maize internode mg/g

处理因素 Treatment factor	处理水平 Treatment level	2011 年玉米生长期 Maize growth period in 2011				2012 年玉米生长期 Maize growth period in 2012			
		11 展叶 V ₁₁	13 展叶 V ₁₃	吐丝期 Silking	成熟期 Harvest	11 展叶 V ₁₁	13 展叶 V ₁₃	吐丝期 Silking	成熟期 Harvest
		乙烯利 Ethephon (E)	对照 CK	157.0 b	215.3 a	236.3 a	188.5 a	169.0 b	205.3 b
氮肥 Nitrogen rate (N)	空白 N0	173.4 a	234.3 a	216.7 ab	181.0 a	174.1 ab	206.3 a	242.7 ab	167.9 a
	低氮 N150	165.0 b	207.5 b	212.6 ab	184.1 a	177.6 a	211.7 a	229.7 c	159.2 a
	中氮 N225	153.9 c	209.5 b	205.6 b	184.8 a	168.6 c	211.3 a	232.2 bc	167.9 a
	高氮 N300	159.1 bc	214.1 b	224.1 a	178.2 a	170.6 bc	211.9 a	247.8 a	160.0 a
变异来源 Sources of variation	乙烯利 E	***	NS	***	*	**	**	NS	*
	氮肥 N	***	*	NS	NS	**	NS	**	NS
	乙烯利×氮肥 E×N	***	*	*	**	*	NS	NS	**

表 4 乙烯利和氮肥对玉米节间纤维素含量的影响

Table 4 Effect of ethephon and nitrogen rate on cellulose concentration of spring maize internode mg/g

处理因素 Treatment factor	处理水平 Treatment level	2011 年玉米生长期 Maize growth period in 2011				2012 年玉米生长期 Maize growth period in 2012			
		11 展叶 V ₁₁	13 展叶 V ₁₃	吐丝期 Silking	成熟期 Harvest	11 展叶 V ₁₁	13 展叶 V ₁₃	吐丝期 Silking	成熟期 Harvest
		乙烯利 Ethephon (E)	对照 CK	146.1 b	323.9 a	349.4 a	306.7 a	208.9 a	294.9 a
氮肥 Nitrogen rate (N)	空白 N0	168.8 a	317.5 c	312.0 ab	280.5 ab	203.0 c	298.8 a	326.0 a	273.2 a
	低氮 N150	156.7 ab	337.2 ab	324.9 a	287.9 a	212.6 a	274.4 c	309.3 b	245.2 b
	中氮 N225	136.3 c	319.8 bc	294.3 b	268.8 b	204.4 c	288.6 b	289.7 c	238.7 b
	高氮 N300	154.8 b	339.6 a	305.9 b	274.9 ab	209.4 b	286.4 b	313.3 b	232.5 b
变化来源 Sources of variation	乙烯利 E	**	NS	***	***	**	***	NS	NS
	氮肥 N	**	NS	*	NS	***	***	***	**
	乙烯利×氮肥 E×N	NS	NS	NS	**	***	***	**	***

2.4 相关性分析

通过相关性分析可知,在 2011 年,抗折断力与节间最大直径($r=0.98, P<0.001$)、最小直径($r=0.99, P<0.001$)、单位节间长度干重($r=0.97, P<0.001$)和氮含量($r=0.86, P<0.01$)显著正相关,与干重呈不显著正相关($r=0.11, P>0.05$),而与节间长度($r=-0.52, P>0.05$)、半纤维素($r=-0.26, P>0.05$)、纤维素($r=-0.59, P>0.05$)和木质素含量($r=-0.64, P>0.05$)呈负相关且

不显著(表 6)。在 2012 年,抗折断力与节间最大直径($r=0.91, P<0.01$)、最小直径($r=0.90, P<0.01$)、单位节间长度干重($r=0.96, P<0.001$)和氮含量($r=0.81, P<0.05$)显著正相关,与纤维素含量呈不显著正相关($r=0.21, P>0.05$),而与节间长度($r=-0.64, P>0.05$)、干重($r=-0.19, P>0.05$)、纤维素($r=-0.46, P>0.05$)和木质素含量($r=-0.45, P>0.05$)呈负相关且不显著。

表5 乙烯利和氮肥对玉米节间木质素含量的影响

Table 5 Effect of ethephon and nitrogen rate on lignin concentration of spring maize internode mg/g

处理因素 Treatment factor	处理水平 Treatment level	2011年玉米生长期 Maize growth period in 2011				2012年玉米生长期 Maize growth period in 2012			
		11展叶 V ₁₁	13展叶 V ₁₃	吐丝期 Silking	成熟期 Harvest	11展叶 V ₁₁	13展叶 V ₁₃	吐丝期 Silking	成熟期 Harvest
		乙烯利 Ethephon (E)	对照 CK	8.1 a	25.4 a	46.5 a	38.2 a	7.5 a	19.9 a
	乙烯利 E	7.9 a	27.3 a	42.2 a	33.8 a	6.6 a	14.6 b	27.8 b	22.9 a
氮肥 Nitrogen rate (N)	空白 N0	7.7 a	26.0 ab	44.0 ab	40.0 a	6.8 a	14.7 a	34.9 a	28.8 a
	低氮 N150	7.6 a	29.8 a	49.7 a	36.2 ab	7.1 a	17.3 a	35.1 a	22.3 ab
	中氮 N225	7.4 a	21.7 b	40.3 b	37.2 ab	7.6 a	17.0 a	27.4 a	23.5 ab
	高氮 N300	9.4 a	29.8 a	43.4 ab	30.6 b	6.7 a	20.0 a	30.9 a	19.6 b
变化来源 Sources of variation	乙烯利 E	NS	NS	NS	NS	NS	*	*	NS
	氮肥 N	NS	*	NS	NS	NS	NS	NS	NS
	乙烯利×氮肥 E×N	NS	NS	NS	NS	*	NS	NS	*

表6 抗折断力和其他节间性状的相关性分析

Table 6 Correlation analysis between breaking resistance and other maize internode characteristics

变量 Variable	2011年抗折断力 Breaking resistance in 2011	2012年抗折断力 Breaking resistance in 2012
最大直径 Maximum diameter	0.98***	0.91**
最小直径 Minimum diameter	0.99***	0.90**
节间长度 Internode length	-0.52	-0.64
干重 Dry weight	0.11	-0.19
单位节间长度干重 Dry weight per unit internode length	0.97***	0.96***
氮含量 Nitrogen concentration	0.86**	0.81*
半纤维素含量 Hemicellulose concentration	-0.26	0.21
纤维素含量 Cellulose concentration	-0.59	-0.46
木质素含量 Lignin concentration	-0.64	-0.45

3 讨论

玉米茎秆倒伏增加机械收获难度和成本,同时导致玉米减产5%~25%^[18]。增施氮肥有利于提高玉米产量,但是过量施用氮肥会弱化玉米茎秆质量,提高倒伏风险^[10-11]。随着氮肥施用量的增加,节间碳氮比和抗折断力下降^[19],与低氮(N225)处理相比,高氮(300N)处理的小麦倒伏率明显提高,从11.1%增加到39.0%^[20]。而乙烯利等植物生长调节剂可以缩短基部节间长度,提高基部节间直径和机械

强度,是防止倒伏的有效措施^[6,15]。本研究发现随着氮肥水平的提高,玉米产量呈增加趋势,其中与N0处理相比,N225处理下的玉米产量提高6.5%~14.1%,而乙烯利对玉米产量具有负面效应(数据未呈现)。Norberg等^[21]也发现喷施乙烯利对产量有负面影响,大约减产1000 kg/hm²,但是降低9%~30%的倒伏率。而华北平原位于暖温带季风气候带,降雨量集中在7—8月,多风多雨的天气加剧了玉米倒伏的风险,因此需要加强倒伏防范措施。丰光等^[22]研究了20个玉米品种根茎主要性状

与倒伏的关系,发现玉米倒伏与茎秆拉力、穿刺力、茎粗和种植密度等显著相关。茎秆倒伏主要发生在地部第3~5节^[2-4],因此地部第3伸长节间(即第9节间)的相关性状对研究提高其抗倒伏能力很重要。抗折断力与倒伏关系密切,是评价抗倒伏能力的重要指标^[6,23-34]。汪黎明等^[25]测定了69份玉米自交系材料的茎秆基部抗推力,发现抗推力与茎秆直径显著正相关。本研究发现抗折断力与节间最大直径和最小直径显著正相关,这与Islam等^[24]和Tripathi等^[26]的研究结果一致。有研究^[27]表明抗倒伏大麦品种的单位节间长度干重高达0.235 mg/cm,而易倒伏品种的只有0.175 mg/cm。本研究通过相关性分析发现抗折断力与单位节间长度干重正相关且达到显著水平。抗倒伏能力与基部节间长度显著负相关^[13-14],本试验也发现抗折断力与节间长度负相关,但是相关性不显著。这些结果表明粗壮矮短的节间抗倒伏性能更好。有研究^[28]报道乙烯利降低了基部节间生长素和赤霉素含量,抑制基部1~6节间的伸长,显著降低株高和穗位高,从而有利于提高抗倒伏能力。在本研究氮肥施用量范围内,氮肥能提高节间直径、单位节间长度干重和抗折断力,但是N300和N225处理之间差异不显著。喷施乙烯利则可以提高节间直径、单位节间长度干重和抗折断力并缩短节间长度。表明增施适量的氮肥和乙烯利是协同增效的作用,可以塑造良好形态性状的节间,有助于提高玉米的抗倒伏能力。

在本研究中,抗折断力与节间全氮含量呈显著正相关,这与魏凤珍等^[29]等的研究结果不一致,但也有研究^[11,30]表明提高全氮含量有助于提高抗折断力。结构性碳水化合物如半纤维素、纤维素和木质素含量与倒伏关系密切^[8],一般来说,抗倒伏品种的纤维素和木质素含量较高,但是Knapp等^[31]证明抗倒伏品种和易倒伏品种基部节间纤维素和木质素含量的变化在5%以内;有些学者^[6,32]则认为纤维素和半纤维素含量与倒伏之间没有关系。通过比较矮秆品种和高秆品种的纤维素和木质素含量,Beem等^[33]发现矮秆品种的纤维素和木质素含量更低,他们认为可能是低含量的纤维素和木质素使得茎秆更加有韧性从而提高其抗倒伏能力。而本研究也发现抗折断力与基部节间纤维素和木质素含量呈负相关,这可能与作物品种、田间管理措施和环境变异有关,因此有必要在华北平原的环境条件和管理措施下,研究并确定抗折断力与节间性状的关系,为提高

玉米抗倒伏性能提供依据。随着氮肥水平的提高,节间半纤维素、纤维素和木质素含量有下降的趋势。有研究表明氮肥过量,蛋白质合成多,节间纤维、木质素合成少,C/N比下降,机械组织松软,容易引起倒伏^[34-35]。小麦基部节间细胞壁纤维素、木质素含量随施氮水平的增加呈现出先增后降的趋势,植株抗倒伏能力随基肥量增加和总施肥的加大而降低^[29]。半纤维素含量与抗折断力在2011年是负相关而在2012年是正相关,表现出不稳定性,这可能与半纤维素较纤维素和木质素更容易降解有关。乙烯利可以降低节间纤维素和木质素,提高节间抗折断力,这与Tripathi等^[36]的研究结果是一致的,他们通过分析小麦基部节间纤维发现乙烯利处理降低了节间的纤维素和木质素含量,但是可以有效控制倒伏。可见乙烯利和氮肥可以调控基部节间化学性状以提高玉米抗倒伏性能。

4 结 论

本研究氮肥施用量范围内,增施氮肥可以提高基部节间直径、单位节间长度干重和抗折断力,但是N300和N225处理之间差异不显著;随着氮肥水平的提高,基部节间全氮含量提高,节间纤维素、半纤维素和木质素含量有降低的趋势。喷施乙烯利则可以提高节间直径、单位节间长度干重和抗折断力并缩短节间长度。乙烯利和氮肥对节间形态和化学性状有互作效应,增施适量的氮肥和乙烯利是协同增效的作用。结果表明氮肥施用225 kg/hm²的基础上配合拔节期喷施180 g/hm²乙烯利可以塑造粗壮矮短的基部节间,有助于提高玉米的抗倒伏能力。

参 考 文 献

- [1] Kang M S, Din A K, Zhang Y, et al. Combining ability for rind puncture resistance in maize[J]. *Crop Sci*, 1999, 39(2): 368-371
- [2] 程富丽, 杜雄, 刘梦星, 等. 玉米倒伏及其对产量的影响[J]. *玉米科学*, 2011, 19(1): 105-108
- [3] Setter T L, Laureles E V, Mazaredo A M. Lodging reduces yield of rice by self-shading and reductions in canopy photosynthesis[J]. *Field Crop Res*, 1997, 49(2): 95-106
- [4] 勾玲, 赵明, 黄建军, 等. 玉米茎秆弯曲性能与抗倒能力的研究[J]. *作物学报*, 2008, 34(4): 653-661
- [5] Peiffer J A, Flint-Garcia S A, De Leon N, et al. The genetic architecture of maize stalk strength[J]. *PLoS One*, 2013, 8(6): e67066
- [6] Hondroyianni E, Papakosta D K, Gagianas A A, et al. Corn

- stalk traits related to lodging resistance in two soils of differing salinity[J]. *Maydica*, 2000, 45(2):125-133
- [7] Zhu L, Chen J, Li D, et al. QTL mapping for stalk related traits in maize (*Zea mays* L) under different densities[J]. *J Integ Agr*, 2013, 12(2):218-228
- [8] Bosch M, Mayer C D, Cookson A, et al. Identification of genes involved in cell wall biogenesis in grasses by differential gene expression profiling of elongating and non-elongating maize internodes[J]. *J Expbot*, 2011, 62(10):3545-3561
- [9] Kashiwagi T, Hirotsu N, Ujiie K, et al. Lodging resistance locus *prl5* improves physical strength of the lower plant part under different conditions of fertilization in rice (*Oryza sativa* L)[J]. *Field Crop Res*, 2010, 115(1):107-115
- [10] Rajkumara S. Lodging in cereals: A review[J]. *Agric Rev*, 2008, 29(1):55-60
- [11] 刘明, 齐华, 张卫建, 等. 深松方式与施氮量对玉米茎秆解剖结构及倒伏的影响[J]. *玉米科学*, 2013, 21(1):57-63
- [12] Hobbs P R, Sayre K D, Ortiz-Monasterio J I. Increasing wheat yields sustainably through agronomic means[C]. *Mexicocity: International Maize and Wheat Improvement Center*, 1998
- [13] 杨世民, 谢力, 郑顺林, 等. 氮肥水平和栽插密度对杂交稻茎秆理化特性与抗倒伏性的影响[J]. *作物学报*, 2009, 35(1):93-103
- [14] 王成雨, 代兴龙, 石玉华, 等. 氮肥水平和种植密度对冬小麦茎秆抗倒性能的影响[J]. *作物学报*, 2012, 38(1):121-128
- [15] Wiersma J J, Dai J, Durgan B R. Optimum timing and rate of trinexapac-ethyl to reduce lodging in spring wheat[J]. *Agron J*, 2011, 103(3):864-870
- [16] Sparks D L, Page A L, Helmke P A, et al. Methods of soil analysis Part 3-Chemical methods[M]. *Madison: Soil Science Society of America Inc*, 1996
- [17] Van Soest P J, Robertson J B, Lewis B A. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition[J]. *J Dairy Sci*, 1991, 74(10):3583-3597
- [18] Zuber M S, Kang M S. Corn lodging slowed by sturdier stalks[J]. *Crops Soils*, 1978, 3(5):18-19
- [19] 张倩, 张明才, 刘明, 等. 氮肥-生长调节剂对寒地春玉米植株形态及产量的互作效应研究[J]. *中国农业大学学报*, 2014, 19(5):29-37
- [20] 陈晓光, 石玉华, 王成雨, 等. 氮肥和多效唑对小麦茎秆木质素合成的影响及其与抗倒伏性的关系[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(17):3529-3536
- [21] Norberg O S, Mason S C, Lowry S R. Ethephon influence on harvestable yield, grain quality, and lodging of corn[J]. *Agron J*, 1988, 80(5):768-772
- [22] 丰光, 李妍妍, 景希强, 等. 夏玉米根茎主要性状与倒伏性的关系研究[J]. *河南农业科学*, 2010(11):20-22
- [23] Esehie H A, Rodriguez V, Al-Asmi H. Comparison of local and exotic maize varieties for stalk lodging components in a desert climate[J]. *Eur J Agron*, 2004, 21(1):21-30
- [24] Islam M S, Peng S, Visperas R M, et al. Lodging-related morphological traits of hybrid rice in a tropical irrigated ecosystem[J]. *Field Crop Res*, 2007, 101(2):240-248
- [25] 汪黎明, 李建生, 姚国旗, 等. 玉米茎秆与根系抗倒的特性研究[J]. *玉米科学*, 2012, 20(2):69-74
- [26] Tripathi S C, Sayre K D, Kaul J N, et al. Growth and morphology of spring wheat (*Triticum aestivum* L) culms and their association with lodging: Effects of genotypes, N levels and ethephon[J]. *Field Crop Res*, 2003, 84(3):271-290
- [27] White E M. Response of winter barley cultivars to nitrogen and a plant growth regulator in relation to lodging[J]. *J Agr Sci*, 1991, 116(02):191-200
- [28] 卫晓轶, 张明才, 李召虎, 等. 不同基因型玉米对乙烯利调控反应敏感性的差异[J]. *作物学报*, 2011, 37(10):1819-1827
- [29] 魏凤珍, 李金才, 王成雨, 等. 氮肥运筹模式对小麦茎秆抗倒性能的影响[J]. *作物学报*, 2008, 34(6):1080-1085
- [30] Esehie H A. Relationship of stalk morphology and chemical composition to lodging resistance in maize (*Zea mays* L) in a rainforest zone[J]. *J Agr Sci*, 1985, 104(2):429-433
- [31] Knapp J S, Harms C L, Volenec J J. Growth regulator effects on wheat culm nonstructural and structural carbohydrates and lignin[J]. *Crop Sci*, 1987, 27(6):1201-1205
- [32] Kong E, Liu D, Guo X, et al. Anatomical and chemical characteristics associated with lodging resistance in wheat[J]. *Crop J*, 2013, 1(1):43-49
- [33] Beem J V, Farquhar T, Meyers H, et al. Influence of the *Rht* dwarfing genes on stem morphology, biochemistry and biomechanics and associated lodging effects in wheat [C]// *Proceedings of the 9th International Wheat Genetics Symposium*. *Saskatoon: University of Extension Press*, 1998: 366-368
- [34] Li H, Li L, Wegenast T, et al. Effect of N supply on stalk quality in maize hybrids[J]. *Field Crop Res*, 2010, 118(3):208-214
- [35] Zhang W J, Li G H, Yang Y M, et al. Effects of nitrogen application rate and ratio on lodging resistance of super rice with different genotypes[J]. *J Integ Agr*, 2014, 13(1):63-72
- [36] Tripathi S C, Sayre K D, Kaul J N. Fibre analysis of wheat genotypes and its association with lodging: Effects of nitrogen levels and ethephon[J]. *Cereal Res Commun*, 2003, 31(3/4):429-436