

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2011.01819

## 不同基因型玉米对乙烯利调控反应敏感性的差异

卫晓轶 张明才 李召虎 段留生\*

植物生长调节剂教育部工程研究中心 / 中国农业大学农学与生物技术学院农学系, 北京 100193

**摘 要:** 倒伏是玉米高产栽培中导致产量严重下降的关键性限制因素之一, 应用植物生长调节剂乙烯利或复配剂改善玉米茎秆质量、提高抗倒能力, 是解决玉米倒伏的有效途径。本研究以玉米杂交种农大 108、鲁单 981 及其相应亲本许 178、黄 C、齐 319 和 lx9801 为材料, 在拔节期叶面喷施 200 mg L<sup>-1</sup> 乙烯利药液, 研究了乙烯利对不同基因型玉米株型及其生理生化特征的影响。结果表明, 乙烯利处理显著降低了农大 108、鲁单 981 的株高和穗位高, 特别是显著抑制了基部第 1 至 6 节间伸长; 乙烯利处理显著提高了基部伸长节间中的苯丙氨酸解氨酶(PAL)和吲哚乙酸氧化酶(IAAO)活性, 降低了基部伸长节间中生长素(IAA)和赤霉素(GA<sub>4</sub>)含量, 增加了脱落酸(ABA)的积累。乙烯利处理显著降低了亲本许 178、黄 C、齐 319 和 lx9801 的株高和穗位高, 显著缩短了基部节间长度; 乙烯利处理后显著提高了基部伸长节间 PAL 和 IAAO 活性, 显著降低了节间 IAA 和 GA<sub>4</sub> 含量, 提高了脱落酸含量, 降低了 GA<sub>4</sub>/ABA 比值。结合植株性状和生理生化特征分析, 杂交种对乙烯利调控反应敏感性差异是由其双亲对乙烯利反应差异造成的, 表现在乙烯利处理父母本间株高、穗位高、PAL 和 IAAO 活性以及内源激素含量变化上存在显著差异。

**关键词:** 乙烯利; 玉米; 伸长节间

## Differences in Responding Sensitivity to Ethephon among Different Maize Genotypes

WEI Xiao-Yi, ZHANG Ming-Cai, LI Zhao-Hu, and DUAN Liu-Sheng\*

Engineering Research Center of Plant Growth Regulator, Ministry of Education / College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China

**Abstract:** Lodging is one of the key limiting factors causing serious yield decline in maize cultivation, the plant growth regulator ethephon and its complex formulation are applied to improve quality and lodging-resistance ability of stalks, which is an effective way to prevent stalk lodging. The responses in plant-type, physiological and biochemical characteristics of maize hybrid Nongda 108, Ludan 981 and their corresponding parents Xu 178, Huang-C, Qi 319, and lx9801 varieties, were studied in field condition, with 200 mg L<sup>-1</sup> ethephon foliage spray at jointing stage. The results showed that ethephon significantly inhibited the elongation of the first to sixth basal internodes for Nongda 108 and Ludan 981, the plant height and the ear height of Nongda 108 and Ludan 981 were significantly reduced. Ethephon remarkably increased the activities of phenylalanine ammonia lyase (PAL) and indole acetic acid oxidase (IAAO) and content of abscisic acid (ABA) in elongating internodes, and decreased contents of auxin (IAA) and gibberellin (GA<sub>4</sub>). The genetic traits were analyzed, the plant height and the ear height of Xu 178, Huang-C, Qi 319, and lx9801 were significantly reduced after ethephon treating, and the length of basal internodes was shortened significantly. The PAL and IAAO activities in elongating internodes were significantly increased after ethephon treating. The endogenous IAA content of elongating internodes was significantly decreased, ABA content was significantly increased, but GA<sub>4</sub>/ABA ratio was significantly decreased. It is indicated that the response differences to ethephon among different hybrids may be attributed to the different sensitivities of the parents lines, showing corresponding performance in plant height, ear height, PAL, IAAO activities and endogenous hormone levels.

**Keywords:** Ethephon; Maize; Elongating internodes

本研究由中央高校基本科研业务费专项资金项目和科技支撑计划项目(2006BAD02A15)资助。

\* 通讯作者(Corresponding author): 段留生, E-mail: duanlsh@cau.edu.cn, Tel: 010-62731301

第一作者联系方式: E-mail: xiaoyi\_919@126.com, Tel: 010-62733049

Received(收稿日期): 2011-03-28; Accepted(接受日期): 2011-06-25; Published online(网络出版日期): 2011-07-28.

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20110728.1000.002.html>

玉米是重要的粮食、饲料和工业原料。随着需求量的不断增加,玉米成为世界谷类作物单产和总产最高的作物,在我国仅次于水稻,但总产增加主要依赖于单产的提高。适当增加密度是提高玉米单产的有效手段,然而增加密度易造成玉米茎秆脆弱和倒伏,严重减产,已成为提高玉米产量的关键性限制因素<sup>[1-3]</sup>。Esechie 等<sup>[4]</sup>研究表明倒伏和产量呈负相关,因此,创建合理的群体结构是玉米高产栽培的重要环节。在玉米生产中,为了发挥密植增产效应,不仅要选择紧凑型品种,还要通过栽培措施有针对性地合理调控个体株型和群体结构,以提高植株抗逆(如倒伏)能力。

近年来,化学控制技术在玉米生产中的研究和应用取得了重大进展,并成为我国玉米高产、稳产、高效栽培中的重要组成部分。如应用植物生长调节剂乙烯利可降低玉米的穗位高,增加茎粗,是防止倒伏的有效措施<sup>[5-8]</sup>。乙烯利有效成分 2-氯乙基膦酸可释放乙烯<sup>[9]</sup>,抑制细胞伸长并增加细胞的横向膨胀,进而抑制茎秆的伸长生长<sup>[10]</sup>。乙烯作为一种植物激素,与 IAA(生长素)、GA(赤霉素)、ABA(脱落酸)等以不同的方式相互作用,共同调节着玉米节间生长的变化<sup>[11-13]</sup>。然而,在玉米生产中不同玉米品种对乙烯利调控效应具明显差异,造成这种现象的原因是否与玉米品种的敏感性以及遗传背景差异有关,需进一步研究。本项研究是以两个紧凑型玉米品种农大 108 和鲁单 981 为材料,在玉米拔节初期叶面喷施乙烯利,比较研究株高、穗位高、与信号物质代谢相关酶以及内源激素含量的变化,结合农大 108 的亲本(许 178 和黄 C)和鲁单 981 的亲本(齐 319 和 1x9801)相关性状和生理生化分析,从遗传背景角度,探讨不同基因型玉米对乙烯利调控反应敏感性差异的机制,为乙烯利在玉米生产应用提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与设计

试验于 2009 和 2010 年夏在中国农业大学上庄实验站进行。土壤为中壤土,前茬为蔬菜,耕作层(0~20 cm)有机质含量 34.2 g kg<sup>-1</sup>,全氮含量 1.4 g kg<sup>-1</sup>,速效磷含量 74.5 mg kg<sup>-1</sup>,速效钾含量 143.0 mg kg<sup>-1</sup>。

供试品种为农大 108 及其亲本许 178 和黄 C,鲁单 981 及其亲本齐 319 和 1x9801。其中,农大 108

株高 260 cm,穗位 110 cm,穗位以下叶片平展,穗位以上叶片上冲,株型半紧凑,属中晚熟品种,父本许 178 属平展型,母本黄 C 属半紧凑型。鲁单 981 株高 280 cm,穗位高 108 cm,株型半紧凑,生长速度快,活秆成熟,尤其是中期茎秆生长速度较快,属中早熟品种,母本齐 319 选自美国玉米杂交种 78599,属平展型,父本 1x9801 是以 502/H21 为选系基础材料,经连续自交选择而成,属紧凑型。

设 200 mg L<sup>-1</sup> 乙烯利处理(经过玉米田间乙烯利浓度筛选确定,乙烯利由植物生长调节剂教育部工程研究中心提供),清水作对照,在玉米拔节期叶龄指数为 40% (九叶期)时叶面喷施,每公顷药液量为 450 kg。2009 年 5 月 6 日和 2010 年 5 月 10 日播种玉米,密度为每公顷 52 500 株,小区面积为 40 m<sup>2</sup>,4 次重复,随机排列。按当地常规管理田间水肥。

### 1.2 测定内容与方法

1.2.1 株高、穗位高及节间长度的测定 玉米成熟后,分别于 2009 年 9 月 16 日和 2010 年 9 月 21 日收获。届时每小区取 10 株,4 次重复。自然风干后,测农大 108 和鲁单 981 的株高、穗位高及基部第 1 节到第 12 节的节间长度;测亲本许 178、黄 C、齐 319 和 1x9801 的株高、穗位高及基部第 3 节到第 5 节的节间长度,单位均为厘米(cm)。

1.2.2 PAL 和 IAAO 酶活性的测定 乙烯利处理后 4 d,从田间选取农大 108 和鲁单 981 及其亲本代表性植株的基部第 3 节间(此时第 3 节间处于快速伸长阶段),测定苯丙氨酸解氨酶(PAL)<sup>[14]</sup>和吲哚乙酸氧化酶(IAAO)<sup>[15]</sup>的活性。

1.2.3 内源激素 IAA、ABA 和 GA<sub>4</sub> 含量的测定

乙烯利处理后 4 d,从田间选取农大 108 和鲁单 981 及其亲本代表性植株的基部第 3 节间,采用酶联免疫法<sup>[16]</sup>测定内源激素 IAA、ABA 和 GA<sub>4</sub> 含量。

1.2.4 数据分析 取 2009 和 2010 年两年数据的平均值,并采用 SAS V8 软件统计分析数据。

## 2 结果与分析

### 2.1 乙烯利对农大 108 和鲁单 981 及其亲本节间生长的调控

2.1.1 乙烯利对玉米株高和穗位高的影响 乙烯利处理显著降低了农大 108 和鲁单 981 的株高,分别比对照降低了 12.0%和 4.3%;同时显著降低了农大 108 和鲁单 981 的穗位高,分别比对照降低 6.3%和 13.7% (表 1 和表 2)。

表 1 乙烯利对农大 108 和鲁单 981 及其亲本株高的影响  
Table 1 Effects of ethephon on plant height for Nongda 108 and Ludan 981 and their parents (cm)

处理 Treatment	品种 Variety		自交系 Inbred line			
	农大 108 Nongda 108	鲁单 981 Ludan 981	许 178 Xu 178	黄 C Huang-C	齐 319 Qi 319	1x9801
乙烯利 Ethephon	213.5 bB	286.0 bA	154.0 bD	170.8 bC	194.7 bB	211.6 bA
对照 CK	242.7 aB	298.8 aA	164.5 aD	192.0 aC	210.3 aB	231.7 aA

不同小写字母代表处理和对照间差异达 0.05 显著水平；不同大写字母代表品种间/自交系间差异达 0.05 显著水平。

Different small letters mean significance at the 0.05 probability level between treatment and CK. Different capital letters mean significance at the 0.05 probability level between varieties/inbred lines.

表 2 乙烯利对农大 108 和鲁单 981 及其亲本穗位高的影响  
Table 2 Effects of ethephon on ear height for Nongda 108 and Ludan 981 and their parents (cm)

处理 Treatment	品种 Variety		自交系 Inbred line			
	农大 108 Nongda 108	鲁单 981 Ludan 981	许 178 Xu 178	黄 C Huang-C	齐 319 Qi 319	1x9801
乙烯利 Ethephon	103.8 bB	106.8 bA	55.7 bC	63.0 bB	72.4 bB	81.1 bA
对照 CK	110.8 aB	123.8 aA	64.3 aC	86.0 aB	82.7 aB	96.7 aA

不同小写字母代表处理和对照间差异达 0.05 显著水平；不同大写字母代表品种间/自交系间差异达 0.05 显著水平。

Different small letters mean significance at the 0.05 probability level between treatment and CK. Different capital letters mean significance at the 0.05 probability level between varieties/inbred lines.

乙烯利处理显著降低了许 178、黄 C、齐 319 和 1x9801 的株高及穗位高，株高分别比对照降低了 6.4%、11.0%、7.4%和 8.6%，穗位高分别比对照降低了 15.4%、31.7%、14.2%和 19.2%。从自交系间分析，在乙烯利处理或清水处理下，4 个自交系的株高之间差异均达到显著水平，株高依次为 1x9801>齐 319>黄 C>许 178；黄 C 和齐 319 的穗位高差异不显著，而与许 178 和 1x9801 间差异均达到显著水平，穗位高依次为 1x9801>黄 C>齐 319>许 178。

2.1.2 乙烯利对玉米节间长度的影响 乙烯利处理显著抑制了基部第 1 至第 6 节间伸长，其中在农

大 108 上，基部第 1 节间和第 2 节间分别比对照缩短了 24.0%和 31.1%，差异达到极显著水平( $P<0.01$ )；而在鲁单 981 上，基部第 1 节到第 6 节的节间长度分别比对照缩短 83.0%、52.3%、43.5%、34.4%、35.6%和 34.2%，差异达到极显著水平( $P<0.01$ )(表 3)。在穗位节以上，乙烯利处理玉米节间出现不同程度的快速生长，如在农大 108 上，第 7 节到第 12 节的节间长度与对照差异不显著，其中的第 9 至第 11 节间比对照长；在鲁单 981 上，第 8 至第 11 节间长度显著长于对照，其中第 8 节间长度与对照差异极显著。出现这种节间生长加速的情况，在植物学上称之为

表 3 乙烯利对农大 108 和鲁单 981 节间长度的影响  
Table 3 Effects of ethephon on internodes length for Nongda 108 and Ludan 981 (cm)

节间 Internode	农大 108 Nongda 108		鲁单 981 Ludan 981	
	乙烯利 Ethephon	对照 CK	乙烯利 Ethephon	对照 CK
1	7.5±0.5 B	9.3±0.3 A	5.3±0.7 B	9.7±1.0 A
2	9.0±0.9 B	11.8±0.3 A	8.8±1.1 B	13.4±1.1 A
3	11.7±0.6 b	14.0±1.0 a	10.8±1.5 B	15.5±0.5 A
4	11.5±0.9 b	15.3±1.2 a	12.8±1.1 B	17.2±0.8 A
5	12.0±1.0 b	15.2±1.0 a	13.5±0.9 B	18.3±1.6 A
6	15.0±0.7 b	16.7±1.6 a	14.3±1.1 B	19.2±1.0 A
7	16.2±0.8 a	16.5±0.9 a	17.8±2.3 a	19.0±0.9 a
8	16.0±1.0 a	16.7±1.2 a	20.3±0.3 A	17.9±0.5 B
9	17.5±0.5 a	17.0±1.0 a	20.3±0.7 a	18.5±0.4 b
10	16.7±0.6 a	15.7±1.2 a	20.0±0.8 a	18.6±1.7 b
11	16.2±0.8 a	15.2±1.0 a	19.6±0.7a	18.8±0.7 b
12	15.1±0.5 a	15.1±0.8 a	18.5±0.9 a	18.7±0.5 a

不同小、大写字母分别代表处理和对照间差异达 0.05 和 0.01 显著水平。

Different small and capital letters mean significance at the 0.05 and 0.01 probability levels between treatment and CK, respectively.

“反跳现象”。

乙烯利处理显著缩短了许 178、黄 C、齐 319 和 lx9801 的基部第 3 至第 5 节间长度(表 4)。在自交系间比较,基部第 3 至第 5 节间长度依次为齐 319>lx9801>许 178>黄 C。其中,在乙烯利处理下,自交系第 3 节间除许 178 和 lx9801 间差异不显著外,其余均达到显著水平;在第 4 节间除许 178 与黄 C、lx9801 节间长

度差异不显著外,其余均达到显著水平;在第 5 节间许 178、黄 C 和 lx9801 节间长度差异均不显著,而齐 319 与其他几个自交系间差异均达到显著水平。而在清水对照中,各自交系间第 3 节间长度差异显著;在第 4 节间上除黄 C 和许 178 之间外,其他差异均显著;在第 5 节间上,除许 178 与黄 C、lx9801 间节间长度差异不显著外,其余均达到显著水平。

表 4 乙烯利对许 178、黄 C、齐 319 和 lx9801 节间长度的影响  
Table 4 Effects of ethephon on internodes length for Xu 178, Huang-C, Qi 319, and lx9801 (cm)

节间 Internode	处理 Treatment	自交系 Inbreed line			
		许 178 Xu 178	黄 C Huang-C	齐 319 Qi 319	lx9801
3	乙烯利 Ethephon	8.3±0.6 bB	6.8±0.6 bC	13.5±0.5 bA	8.5±0.5 bB
	对照 CK	10.2±0.3 aC	8.5±0.5 aD	15.5±0.5 aA	11.5±0.5 aB
4	乙烯利 Ethephon	8.7±0.3 bBC	8.2±0.6 bC	15.3±0.6 bA	9.5±0.9 bB
	对照 CK	10.8±0.3 aC	10.5±0.5 aC	16.7±0.6 aA	12.3±0.6 aB
5	乙烯利 Ethephon	10.0±1.0 bB	8.8±0.8 bB	14.5±0.5 bA	10.0±1.0 bB
	对照 CK	12.2±0.8 aBC	11.3±1.2 aC	16.0±0.5 aA	13.2±0.3 aB

不同小写字母代表处理和对照间差异达 0.05 显著水平;不同大写字母代表自交系间差异达 0.05 显著水平。

Different small letter mean significance at the 0.05 probability levels between treatment and CK. Different capital letters mean significance at the 0.05 probability level between inbreed lines.

## 2.2 乙烯利对农大 108 和鲁单 981 及其亲本生理指标的调控

2.2.1 乙烯利对 PAL 酶活性的影响 从图 1 可知,乙烯利处理显著提高了伸长节间 PAL 酶活性,其中在农大 108 和鲁单 981 上分别比对照提高了 35.0% 和 39.5%。从品种间比较,在乙烯利处理下,鲁单 981 伸长节间中的 PAL 酶活性比农大 108 高 38.8%,在对照中鲁单 981 伸长节间中的 PAL 酶活性比农大 108 高 34.3%,且品种间的差异均显著。

乙烯利处理显著提高了许 178、黄 C、齐 319 和 lx9801 的伸长节间 PAL 活性,分别比对照提高了 33.4%、36.1%、30.7%和 45.1% (图 2)。从自交系间

比较,在乙烯利或清水处理下,黄 C 和齐 319 的伸长节间 PAL 活性差异不显著,其他自交系间的伸长节间 PAL 活性均存在显著差异,依次为 lx9801>黄 C>齐 319>许 178。

2.2.2 乙烯利对 IAAO 酶活性的影响 图 3 表明,乙烯利处理显著提高了伸长节间 IAAO 活性,其中在农大 108 和鲁单 981 上分别比对照提高了 16.7% 和 15.0%。从品种间比较,在乙烯利处理下,鲁单 981 伸长节间中的 IAAO 活性比农大 108 高 7.6%,在对照中鲁单 981 伸长节间中的 IAAO 活性比农大 108 高 9.3%,但品种间的差异均不显著。

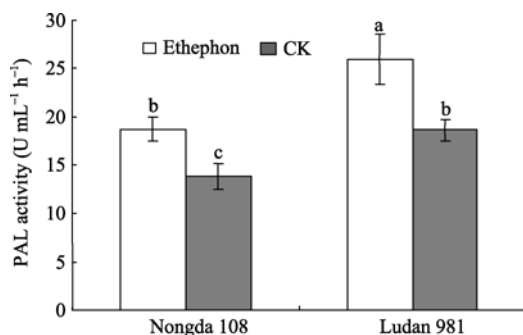


图 1 乙烯利对农大 108 和鲁单 981 第 3 伸长节间 PAL 活性的影响

Fig. 1 Effects of ethephon on PAL enzymatic activities in the third internode for Nongda 108 and Ludan 981

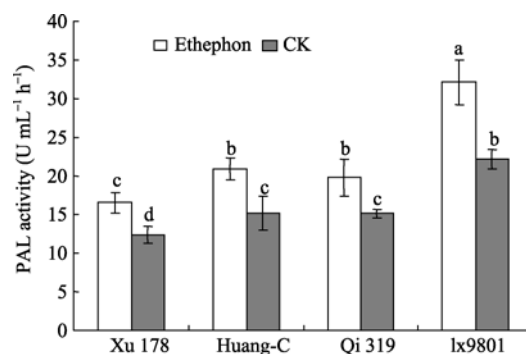


图 2 乙烯利对许 178、黄 C、齐 319 和 lx9801 第 3 伸长节间 PAL 活性的影响

Fig. 2 Effects of ethephon on PAL enzymatic activities in the third internode for Xu 178, Huang-C, Qi 319, and lx9801

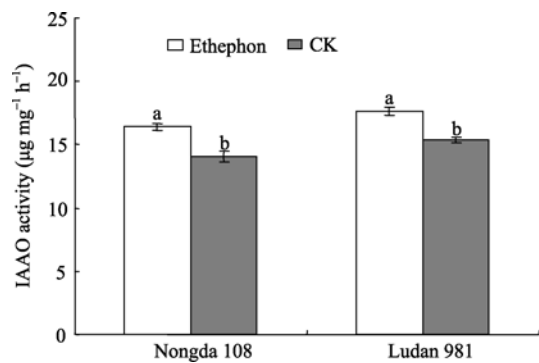


图 3 乙烯利对农大 108 和鲁单 981 第 3 伸长节间 IAAO 活性的影响

Fig. 3 Effects of ethephon on IAAO enzymatic activities in the third internode for Nongda 108 and Ludan 981

乙烯利处理显著提高了许 178、黄 C、齐 319 和 lx9801 的伸长节间 IAAO 活性，分别比对照提高了 15.3%、18.2%、10.0%和 19.3% (图 4)。在自交系间比较，在乙烯利处理或清水处理下，黄 C、齐 319 和 lx9801 伸长节间 IAAO 酶活性之间差异均不显著，但在乙烯利处理下，许 178 伸长节间 IAAO 活性分别比黄 C、齐 319 和 lx9801 低 14.4%、8.8%和 18.8%，且差异达到显著；在对照中许 178 伸长节间 IAAO 活性分别比黄 C、齐 319 和 lx9801 低 12.2%、12.9%和 16.0%，且差异均达显著水平。

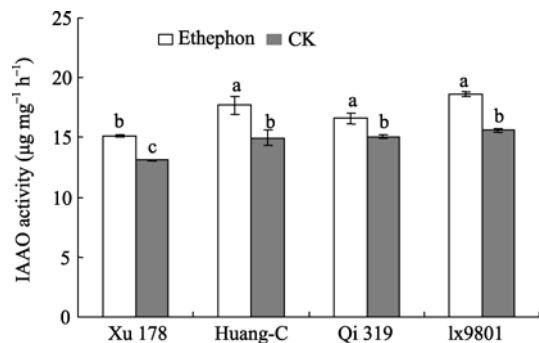


图 4 乙烯利对许 178、黄 C、齐 319 和 lx9801 第 3 伸长节间 IAAO 活性的影响

Fig. 4 Effects of ethephon on IAAO enzymatic activities in the third internode for Xu 178, Huang-C, Qi 319, and lx9801

2.3 乙烯利对农大 108 和鲁单 981 及其亲本内源激素的调控

2.3.1 乙烯利对 IAA 含量的影响 乙烯利处理显著降低了伸长节间 IAA 含量，其中在农大 108 和鲁单 981 上分别比对照降低了 27.1%和 31.2% (表 5)。从品种间比较，在乙烯利处理下，鲁单 981 伸长节间中的 IAA 含量比农大 108 高 12.7%，在对照中鲁单 981 伸长节间中的 IAA 含量比农大 108 高 16.4%，且品种间的差异均显著。

乙烯利处理显著降低了伸长节间 IAA 含量，许 178、黄 C、齐 319 和 lx9801 分别比对照降低了 19.3%、34.8%、25.6%和 37.3%。从自交系间比较，在乙烯利处理下，许 178 和黄 C 伸长节间的 IAA 含量无显著差异，其余自交系间伸长节间的 IAA 含量差异均达显著水平，在对照中齐 319 和 lx9801 伸长节间的 IAA 含量无显著差异，其余自交系间伸长节间的 IAA 含量差异均达显著水平。

2.3.2 乙烯利对 ABA 含量的影响 乙烯利处理显著提高了伸长节间 ABA 含量，其中在农大 108 和鲁单 981 上分别比对照提高了 24.9%和 33.5% (表 6)。而在品种间比较，在乙烯利处理或清水对照下，伸长节间 ABA 含量差异均未达到显著水平。

乙烯利处理显著增加了伸长节间 ABA 含量，许 178、黄 C、齐 319 和 lx9801 分别比对照增加了 19.5%、31.7%、7.7%和 50.9%，自交系间差异显著，在对照中许 178 和 lx9801 的伸长节间 ABA 含量无显著差异，其余自交系间差异均显著，伸长节间 ABA 含量为 lx9801>许 178>黄 C>齐 319。

2.3.3 乙烯利对 GA<sub>4</sub> 含量的影响 乙烯利处理降低了伸长节间 GA<sub>4</sub> 含量，其中在农大 108 和鲁单 981 上分别比对照降低了 7.8%和 9.8% (表 7)，但处理间差异不显著。从品种间比较，在乙烯利处理下，鲁单 981 伸长节间中的 GA<sub>4</sub> 含量比农大 108 高 13.1%，在

表 5 乙烯利对农大 108 和鲁单 981 及其亲本第 3 伸长节间内源激素 IAA 含量的影响

Table 5 Effects of ethephon on IAA content in the third internode for Nongda 108 and Ludan 981 and their parents (μg mg<sup>-1</sup> FW)

处理 Treatment	品种 Variety		自交系 Inbreed line			
	农大 108 Nongda 108	鲁单 981 Ludan 981	许 178 Xu 178	黄 C Huang-C	齐 319 Qi 319	lx9801
乙烯利 Ethephon	388 bB	437 bA	384 bC	391 bC	450 bA	424 bB
对照 CK	493 aB	574 aA	458 aC	527 aB	565 aA	582 aA

不同小写字母代表处理和对照间差异达 0.05 显著水平；不同大写字母代表品种间/自交系间差异达 0.05 显著水平。

Different small letters mean significance at the 0.05 probability level between treatment and CK. Different capital letters mean significance at the 0.05 probability level between varieties/inbreed lines.

表 6 乙烯利对农大 108 和鲁单 981 及其亲本第 3 伸长节间内源激素 ABA 含量的影响  
Table 6 Effects of ethephon on ABA content in the third internode for Nongda 108 and Ludan 981 and their parents ( $\mu\text{g mg}^{-1}\text{FW}$ )

处理 Treatment	品种 Variety		自交系 Inbred line			
	农大 108 Nongda 108	鲁单 981 Ludan 981	许 178 Xu 178	黄 C Huang-C	齐 319 Qi 319	lx9801
乙烯利 Ethephon	291 aA	299 aA	307 aB	274 aC	195 aD	403 aA
对照 CK	233 bA	224 bA	257 bA	208 bB	181 bC	267 bA

不同小写字母代表处理和对照间差异达 0.05 显著水平; 不同大写字母代表品种间/自交系间差异达 0.05 显著水平。  
Different small letters mean significance at the 0.05 probability level between treatment and CK. Different capital letters mean significance at the 0.05 probability level between varieties/inbred lines.

表 7 乙烯利对农大 108 和鲁单 981 及其亲本第 3 伸长节间内源激素 GA<sub>4</sub> 含量的影响  
Table 7 Effects of ethephon on GA<sub>4</sub> content in the third internode for Nongda 108 and Ludan 981 and their parents ( $\mu\text{g mg}^{-1}\text{FW}$ )

处理 Treatment	品种 Variety		自交系 Inbred line			
	农大 108 Nongda 108	鲁单 981 Ludan 981	许 178 Xu 178	黄 C Huang-C	齐 319 Qi 319	lx9801
乙烯利 Ethephon	1.99 aB	2.25 aA	2.16 aB	1.82 aC	3.21 bA	1.29 aD
对照 CK	2.15 aB	2.47 aA	2.31 aB	1.98 aB	3.68 aA	1.36 aC

不同小写字母代表处理和对照间差异达 0.05 显著水平; 不同大写字母代表品种间/自交系间差异达 0.05 显著水平。  
Different small letters mean significance at the 0.05 probability level between treatment and CK. Different capital letters mean significance at the 0.05 probability level between varieties/inbred lines.

对照中鲁单 981 伸长节间中的 GA<sub>4</sub> 含量比农大 108 高 15.2%, 且品种间的差异均显著。

乙烯利处理降低了许 178、黄 C、齐 319 和 lx9801 的伸长节间 GA<sub>4</sub> 含量, 其中齐 319 比对照显著降低了 12.8%, 其余自交系的处理间差异均未达到显著水平。从自交系间比较, 在乙烯利处理下, 许 178、黄 C、齐 319 和 lx9801 间的伸长节间 GA<sub>4</sub> 含量差异均达显著水平, 在对照中许 178 和黄 C 的伸长节间 GA<sub>4</sub> 含量差异不显著, 其余自交系间伸长节间的 GA<sub>4</sub> 含量差异均达显著水平。

3 讨论

3.1 乙烯利对不同基因型玉米形态调控的差异

在玉米拔节期叶面喷施乙烯利可显著降低农大 108 和鲁单 981 的株高和穗位高, 抑制基部第 1 至第 6 节间的伸长。这与人研究结果基本一致, 如李少昆等<sup>[9]</sup>在玉米品种 Sc-704 和石单 3 号上应用乙烯利能降低株高、穗位高及节间长度; 薛金涛等<sup>[17]</sup>利用乙烯利处理中单 808 和京单 28, 发现玉米株高和穗位高显著降低, 增强抗倒伏能力。

不同品种对乙烯利处理株型反应存在差异。在本试验中, 乙烯利处理显著降低了农大 108 和鲁单 981 的穗位高, 但降低的幅度存在明显差异, 如农大 108 降低 6.3%, 而鲁单 981 降低 13.7%。从基部节间伸长上分析, 农大 108 基部第 1 至第 3 节间分别缩短了 24.0%、31.1%和 19.7%, 而鲁单 981 分别缩短 83.0%、52.3%和 43.5%, 存在明显差异。

造成这种差异的原因可能与品种间遗传背景有关。因此, 我们进一步分析了农大 108 和鲁单 981 的父母本对乙烯利的反应, 乙烯利处理使农大 108 的亲本许 178 和黄 C 的基部第 3 节间长度分别比对照缩短 22.3%和 25.0%, 而鲁单 981 的亲本齐 319 和 lx9801 分别比对照缩短 14.8%和 35.3%。在生产中, 农大 108 的父母本可以互换(表明农大 108 父母本遗传距离近), 它们对乙烯利反应的敏感性基本一致, 但是在鲁单 981 中, 父本 lx9801 对乙烯利反应的敏感性显然比其他自交系强烈, 这可能是乙烯利对鲁单 981 与农大 108 调控反应差异的原因。

从株高上分析, 在玉米拔节期进行乙烯利处理显著抑制了基部节间的伸长, 但在乙烯利效应期结束后, 中上部节间伸长显著加快(表 3), 特别在鲁单 981 上, 乙烯利处理的第 8 至第 11 节间长度显著长于对照, 导致鲁单 981 株高仅比对照降低 4.3%, 这与李建民等<sup>[18]</sup>和董学会等<sup>[8]</sup>研究的结果一致。

本试验中选择两个玉米杂交种有不同的遗传背景和显著形态差异。鲁单 981 的亲本齐 319 和 lx9801 的株高、穗位高及第 3 节至第 5 节的节间长度均高于农大 108 的亲本许 178 和黄 C。根据已公布的品种特征, 农大 108 株高与穗位高分别为 260 cm 和 110 cm, 鲁单 981 分别为 280 cm 和 108 cm, 但是本试验中, 无论在乙烯利处理或清水处理下, 鲁单 981 的株高和穗位高均显著高于农大 108。造成这种差异的原因可能是土壤肥力较高, 同时鲁单 981 节间伸长较快且长(相对农大 108), 在高水肥条

件下株高(298.8 cm)和穗位高(123.8 cm)均高于常规值, 而农大 108 抗逆性较强(抗倒等), 基部节间较短, 在春播条件下由于气温等环境因子影响导致生长速率相对较缓, 最终株高(242.7 cm)低于常规值。

### 3.2 乙烯利对不同基因型玉米调控的生理生化差异

吲哚乙酸氧化酶是 IAA 分解代谢的关键酶, 能降解 IAA, 调节植物体内的 IAA 水平<sup>[19]</sup>。植物体内的 IAA 含量变化主要受过氧化物酶和 IAA 氧化酶等的调节<sup>[20]</sup>, 而植物中 IAA 可促进节间伸长生长。在本试验中, 乙烯利处理显著提高了农大 108 和鲁单 981 基部伸长节间 IAAO 的活性, 同时, 显著降低了伸长节间 IAA 含量, 从含量上分析, 鲁单 981 基部伸长节间中的 IAAO 活性比农大 108 高 8.4%, 而鲁单 981 伸长节间 IAA 含量比农大 108 降低 14.5%。从亲本上分析, 乙烯利处理显著提高了许 178、黄 C、齐 319 和 lx9801 的伸长节间 IAAO 的活性, 同时也显著降低了 IAA 含量, 其中许 178 伸长节间 IAAO 活性与其他亲本相比显著降低, 而 lx9801 在各亲本中含量最高, 且 IAA 含量降低的幅度也是 lx9801 最大, 这是导致鲁单 981 基部伸长节间受抑制程度显著高于农大 108 基因型的主要原因之一。

苯丙氨酸解氨酶是连接初级代谢和苯丙烷类代谢、催化苯丙烷类代谢第一步反应的酶, 是苯丙烷类代谢的关键酶和限速酶<sup>[21]</sup>, 是植物次生代谢中 3 个关键酶之一, 对植物体内木质素、植保素、类黄酮、花青素等次生物质的形成起重要的调节作用, 与植物的抗倒性关系密切<sup>[22]</sup>, 许多研究发现 PAL 在细胞分化和木质化中起重要作用, 如木质素的合成及管状分子形成与 PAL 活性的增加呈正相关, 细胞壁的 PAL 活性在木质化期间快速增加等<sup>[23]</sup>, 说明 PAL 很可能与细胞伸长有关, 所以认为 PAL 可以作为研究节间伸长的重要生理指标。PAL 基因随着乙烯生物合成基因的表达而表达, 外源的乙烯也能提高 PAL 的 mRNA 水平, 说明乙烯可能是植物 PAL 诱导表达的内源信号分子<sup>[24-26]</sup>, 乙烯可以促进苯丙

氨酸解氨酶的生成, 提高苯丙氨酸解氨酶的活性<sup>[27]</sup>。本研究发现, 乙烯利处理显著提高了伸长节间 PAL 活性, 从农大 108 与鲁单 981 比较上分析, 鲁单 981 伸长节间中的 PAL 活性比农大 108 高 36.6%, 这与基部节间受乙烯利调节的伸长速率呈显著相关。从亲本上分析, 基部伸长节间 PAL 活性表现出 lx9801>黄 C>齐 319>许 178, 这与基部节间受抑制程度呈显著正相关, 且可以解释鲁单 981 比农大 108 对乙烯利调控更为敏感的原因。

### 3.3 乙烯利对不同基因型玉米调控的内源激素变化差异

植物茎的伸长受多种内外因素的调节和控制, 其中内源植物激素如赤霉素、生长素等的调控起重要作用, 不但通过内源激素水平, 而且还通过激素间的相互作用调节和控制茎的伸长, 如生长素吲哚乙酸、赤霉素、油菜素内酯和乙烯等都促进茎的伸长生长, 而脱落酸对茎的生长具有抑制作用<sup>[28]</sup>。在本研究中, 乙烯利处理显著降低了农大 108 和鲁单 981 基部伸长节间中 IAA 和 GA<sub>4</sub> 含量, 提高了 ABA 含量。但在品种间, 鲁单 981 基部伸长节间中 IAA 和 GA<sub>4</sub> 含量显著高于农大 108, 而 ABA 含量二者之间没有差异, 导致鲁单 981 基部节间长度长于农大 108。从二者的亲本上分析, 他们的变化趋势与杂交种一致。但亲本之间比较, 农大 108 亲本许 178 和黄 C 基部伸长节间中 IAA 显著低于鲁单 981 亲本齐 319 和 lx9801, 这可能造成了齐 319 和 lx9801 基部节间长度显著高于许 178 和黄 C, 其中齐 319 基部节间长度最长, 这与 ABA 含量最低且 GA<sub>4</sub> 含量最高有关。

当植物体内乙烯增加时, IAA、GA、ABA 等激素含量均会发生变化, 有报道说乙烯调节 GA/ABA 的动态平衡<sup>[28]</sup>。乙烯起作用是通过增加 GA 活性<sup>[11]</sup>和降低 ABA 水平, 使植物激素整体处于动态平衡<sup>[29-33]</sup>。本试验结果表明, 鲁单 981 株高和穗位高均高于农大 108, 而基部伸长节间内 GA<sub>4</sub>/ABA 比值鲁单 981 高于农大 108 (表 8)。从亲本上分析, 鲁单

表 8 乙烯利处理对农大 108 和鲁单 981 及其亲本伸长节间内源激素 GA<sub>4</sub>/ABA 比值的影响

Table 8 Impact of ethephon on the ratio of GA<sub>4</sub>/ABA in the third internode for Nongda 108 and Ludan 981 and their parents ( $\times 10^{-3}$ )

处理 Treatment	品种 Variety		自交系 Inbred line			
	农大 108 Nongda 108	鲁单 981 Ludan 981	许 178 Xu 178	黄 C Huang-C	齐 319 Qi 319	lx9801
乙烯利 Ethephon	6.84 bA	7.53 bA	7.03 bB	6.64 bB	16.44 bA	3.20 bC
对照 CK	9.23 aB	11.03 aA	8.98 aB	9.50 aB	20.35 aA	4.70 aC

不同小写字母代表处理和对照间差异达 0.05 显著水平; 不同大写字母代表品种间/自交系间差异达 0.05 显著水平。

Different small letters mean significance at the 0.05 probability level between treatment and CK. Different capital letters mean significance at the 0.05 probability level between varieties/inbred lines.

981 父本 Ix9801 基部伸长节间 GA<sub>4</sub>/ABA 比值显著低于其他亲本, 但其母本齐 319 的 GA<sub>4</sub>/ABA 比值显著高于其他亲本, 这可能是鲁单 981 株高和穗位高高于农大 108 的主要原因。

#### 4 结论

玉米拔节期叶面喷施乙烯利处理可以显著降低农大 108 和鲁单 981 的株高和穗位高, 特别是显著降低基部第 1 至第 6 节间长度, 其中鲁单 981 基部节间缩短的强度显著高于农大 108, 这主要是由于鲁单 981 基部伸长节间中的 PAL 和 IAAO 活性显著高于农大 108, 且鲁单 981 基部伸长节间中 IAA 和 GA<sub>4</sub> 含量显著高于农大 108。杂交种对乙烯利调控反应敏感性的差异是由其双亲对乙烯利反应的差异造成的。

#### References

- [1] Gou L(勾玲), Huang J-J(黄建军), Zhang B(张宾), Li T(李涛), Sun R(孙锐), Zhao M(赵明). Effects of population density on stalk lodging resistant mechanism and agronomic characteristics of maize. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2007, 33(10): 1688–1695 (in Chinese with English abstract)
- [2] Chen Z(陈增), Ke Y-P(柯永培), Yuan J-C(袁继超), Shi H-C(石海春), Duan B-K(段必康), Xie B(谢冰), Yang S-M(杨世民). Effects of maize roborant and uniconazole on plant height and yield of hybrid maize Zhenghong 311 in Panxi region. *Chin Agric Sci Bull* (中国农学通报), 2007, 23(4): 190–192 (in Chinese with English abstract)
- [3] Flint-Garcia S A, Darrah L L, McMullen M D, Hibbard B E. Phenotypic versus marker-assisted selection for stalk strength and second-generation European corn borer resistance in maize. *Theor Appl Genet*, 2003, 107: 1331–1336
- [4] Esechie H A, Rodriguez V, Al-Asmi H S. Comparison of local and exotic maize varieties for stalk lodging components in a desert climate. *Eur J Agron*, 2004, 21: 21–30
- [5] Shekoofa A, Yahya E. Plant growth regulator (ethephon) alters maize (*Zea mays* L.) growth, water use and grain yield under water stress. *J Agron*, 2008, 7: 41–48
- [6] Cai Y-W(蔡永旺), Zhang Y-H(张英华), Zhou S-L(周顺利), Lu L-Q(鲁来清), Wang Z-M(王志敏). Effects of concave canopy structure shaped with ethephon on yield and its correlated characters in summer maize. *J Maize Sci* (玉米科学), 2010, 18(3): 90–94 (in Chinese with English abstract)
- [7] Cox W J, Andrade H F. Growth, yield and yield components of maize as influenced by ethephon. *Crop Sci*, 1988, 28: 536–542
- [8] Dong X-H(董学会), Duan L-S(段留生), He Z-P(何钟佩), Tian X-L(田晓莉), Li J-M(李建民), Wang B-M(王保民), Li Z-H(李召虎). Effects of 30% diethyl-amino-ethyle-hexanoate-ethephon aqueous solution on physiological activities of maize roots. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2005, 31(11): 1500–1505 (in Chinese with English abstract)
- [9] Li S-K(李少昆), Tu Y-H(涂玉华), Zhang W-F(张旺峰). Effect of ethephon on plant type and yield in maize and application in production. *Gengzuo yu Zaipei* (耕作与栽培), 1991, (5): 25–28 (in Chinese)
- [10] Rajala A, Peltonen-sainio P, Onnela M, Jackson M. Effects of applying stem-shortening plant growth regulators to leaves on root elongation by seedlings of wheat, oat and barley: mediation by ethylene. *Plant Growth Regul*, 2002, 38: 51–59
- [11] Rzewuski G, Sauter M. Ethylene biosynthesis and signaling in rice. *Plant Sci*, 2008, 175: 32–42
- [12] Azuma T, Hatanaka T, Uchida N, Yasuda T. Interactions between abscisic acid, ethylene and gibberellin in internodal elongation in floating rice: the promotive effect of abscisic acid at low humidity. *Plant Growth Regul*, 2003, 41: 105–109
- [13] Koch B L, Moore T C. On ethylene and stem elongation in green pea seedlings. *Plant Physiol*, 1990, 93: 1663–1664
- [14] Li H-S(李合生). Principles and Technology of Plant Physiology and Biochemistry Experiments (植物生理生化实验原理和技术). Beijing: Higher Education Press, 2000. pp 213–214 (in Chinese)
- [15] Zhang Z-L(张志良). Experiments Guidance of Plant Physiology (植物生理学实验指导). Beijing: Higher Education Press, 1996. pp 210–213 (in Chinese)
- [16] He Z-P(何钟佩). Experimental Guide for Chemical Control of Crops (农作物化学控制实验指导). Beijing: Beijing Agricultural University Press, 1993. pp 60–68 (in Chinese)
- [17] Xue J-T(薛锦涛), Zhang B-M(张保明), Dong Z-Q(董志强), Zhao M(赵明). Effect of chemical regulation on lodging and yield of maize. *Crops* (作物杂志), 2008, (4): 72–76 (in Chinese with English abstract)
- [18] Li J-M(李建民), Dong X-H(董学会), He Z-P(何钟佩), Hu X-J(胡晓军), Duan L-S(段留生), Li Z-H(李召虎). Effects of mixture of ethephon and mepiquat chloride on growth and yield of summer corn. *Chin J Pesticide Sci* (农药学报), 2004, 6 (4): 83–88 (in Chinese with English abstract)
- [19] Yuan M-D(原牡丹), Hou Z-X(侯智霞), Zhai M-P(翟明普), Su



- Y(苏艳). The research advances on indole-3-acetic acid (IAA) catabolism related enzymes: IAA oxidase (IAAO), peroxidase (POD). *Chin Agric Sci Bull* (中国农学通报), 2008, 24(8): 88–92 (in Chinese with English abstract)
- [20] Jain M L, Kadkade P G, van Hugysse P. The effect of growth regulation chemicals on abscission and IAA-oxidizing enzyme of dwarf been seeding. *Physiol Plant*, 1969, 22: 1033–1042
- [21] Okada T, Mikage M, Sekita S. Molecular characterization of the phenylalanine ammonia-lyase from *Ephedra sinica*. *Biol Pharm Bull*, 2008, 31: 2194–2199
- [22] MacDonald M J, D'Cunha G B. A modern view of phenylalanine ammonia lyase. *Biochem Cell Biol*, 2007, 85: 273–282
- [23] Nakashima J, Awano T, Takabe K, Fujita M, Saiki H. Immunocytochemical localization of phenylalanine ammonia-lyase and cinnamyl alcohol dehydrogenase in differentiating tracheary elements derived from *Zinnia mesophyll* cells. *Plant Cell Physiol*, 1997, 38: 113–123
- [24] Lafuente M T, Zacarias L, Martínez-Téllez M A, Sanchez-Ballesta M T, Dupille E. Phenylalanine ammonia-lyase as related to ethylene in the development of chilling symptoms during cold storage of citrus fruits. *J Agric Food Chem*, 2001, 49: 6020–6025
- [25] Diallinas G, Kanellis A K. A phenylalanine ammonia-lyase gene from melon fruit: cDNA cloning, sequence and expression in response to development and wounding. *Plant Mol Biol*, 1994, 26: 473–479
- [26] Rickey T M, Belknapk W R. Comparison of the expression of several stress responsive genes in potato tubers. *Plant Mol Biol*, 1991, 16: 1009–1018
- [27] Jiang Y M, Joyce D C. ABA effects on ethylene production, PAL activity, anthocyanin and phenolic contents of strawberry fruit. *Plant Growth Regul*, 2003, 39: 171–174
- [28] Ye M-R(叶梅荣), Zhu C-H(朱昌华), Gan L-J(甘立军), Xia K(夏凯). Hormonal interactions in the control of plant stem elongation. *Chin Agric Sci Bull* (中国农学通报), 2007, 23(4): 228–231 (in Chinese with English abstract)
- [29] Sauter M, Kende H. Gibberellin-induced growth and regulation of the cell division cycle in deepwater rice. *Planta*, 1992, 188: 362–368
- [30] Kende H, van der Knaap E, Cho H T. Deepwater rice: a model plant to study stem elongation. *Plant Physiol*, 1998, 118: 1105–1110
- [31] Yang S H, Choi D. Characterization of genes encoding ABA 80-hydroxylase in ethylene-induced stem growth of deepwater rice (*Oryza sativa* L.). *Biochem Biophys Res Commun*, 2006, 350: 685–690
- [32] Hoffmann-Benning S, Kende H. On the role of abscisic acid and gibberellin in the regulation of growth in rice. *Plant Physiol*, 1992, 99: 1156–1161
- [33] Lorbiecke R, Sauter M. Induction of cell growth and cell division in the intercalary meristem of submerged deepwater rice (*Oryza sativa* L.). *Planta*, 1998, 204: 140–145