

冠菌素对玉米抗倒伏能力及产量的影响

陶 群, 黄官民, 郭 庆, 周于毅, 谭伟明, 张明才, 段留生*

(中国农业大学 农学院/植物生长调节剂教育部工程研究中心, 北京 100193)

摘要: 在田间条件下, 以玉米品种先玉 335 和郑单 958 为材料, 在八展叶时于叶面喷施不同浓度 (0、0.01、0.1、1 和 10 $\mu\text{mol/L}$) 冠菌素 (COR), 研究了 COR 对玉米抗倒伏能力及产量的影响。结果表明: 经 10 $\mu\text{mol/L}$ COR 处理后, 先玉 335 的株高和穗位高分别比对照降低了 7.0% 和 19.9%, 郑单 958 分别降低了 20.8% 和 18.2%, 单株叶面积、节间抗折断力、穗下第 8~14 节间长度和节间最大直径与对照间亦差异显著。且随着 COR 浓度的增加, 先玉 335 和郑单 958 的株高、穗位高、单株叶面积和穗下第 8~14 节间长度均逐渐降低; 第 8~14 节间最大直径和节间抗折断力逐渐增大。经 1 $\mu\text{mol/L}$ COR 处理后, 2 个供试玉米品种的产量、穗数、穗粒数和千粒重较对照均有所增加, 其中先玉 335 的产量较对照增加了 9.9%, 郑单 958 增加了 4.3%。综上所述, COR 可以提高玉米的抗倒伏能力, 不同品种玉米对 COR 的敏感性不同, 其中先玉 335 抗倒伏的最适 COR 浓度为 10 $\mu\text{mol/L}$, 郑单 958 抗倒伏的最适 COR 浓度为 1 $\mu\text{mol/L}$ 。

关键词: 冠菌素; 玉米; 抗倒伏能力; 产量; 化学调控; 植物生长调节剂

中图分类号: S482.8

文献标志码: A

文章编号: 1008-7303(2019)01-0043-09

Effects of coronatine on lodging resistance and yield of maize

TAO Qun, HUANG Guanmin, GUO Qing, ZHOU Yuyi,
TAN Weiming, ZHANG Mingcai, DUAN Liusheng*

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

Abstract: A field experiment using maize varieties Xianyu335 and Zhengdan958 was conducted to study the effects of spraying coronatine (COR) with different concentrations (0, 0.01, 0.1, 1 and 10 $\mu\text{mol/L}$) at V8 stage on maize yield and lodging resistance. The results showed that the plant height and ear height of Xianyu 335 treated with 10 $\mu\text{mol/L}$ COR were decreased by 7.0% and 19.9%, respectively. And those of Zhengdan 958 were decreased by 20.8% and 18.2%, respectively. And the leaves area per plant, the breaking resistance, the length of the 8th-14th internodes and the maximum diameter of the 8th-14th internodes were significant different from the control. While the plant height, the ear height, the leaves area per plant, and the length of the 8th-14th internodes were decreased. And the maximum diameter and breaking resistance of the 8th-14th internodes were increased with the increase of the concentration of COR. Grain yield, ears per hm^2 , grain numbers per ear, and thousand grain weight of

收稿日期: 2018-03-11; 录用日期: 2018-11-14.

基金项目: 国家杰出青年科学基金 (3142500208).

作者简介: 陶群, 女, 博士研究生, E-mail: shelleytaoqun@163.com; *段留生, 通信作者 (Author for correspondence), 男, 教授, 主要从事植物生长调节剂及作用机理研究, E-mail: duanlsh@cau.edu.cn

those two maize varieties treated with 1 $\mu\text{mol/L}$ COR were increased compared with the control. The grain yield of Xianyu 335 increased by 9.9% compared with the control, and Zhengdan 958 increased by 4.3% compared with the control. In summary, COR could increase the lodging resistance of maize. The optimal COR concentration for Xianyu335 to increase lodging resistance was 10 $\mu\text{mol/L}$ and that for Zhengdan958 was 1 $\mu\text{mol/L}$, indicating that different maize varieties have different sensitivity levels to COR.

Keywords: coronatine; maize; lodging resistance; grain yield; chemical regulation; plant growth regulator

玉米是中国重要的粮食、饲料和原料作物，在国民经济中占有非常重要的地位^[1]。随着中国人口数量的不断增加和耕地面积日益减少，要保证玉米总产量的持续稳步增加，提高单产势在必行^[2]。大量研究表明，合理密植是提高玉米产量的主要途径，而较高的群体密度使得玉米倒伏的风险也随之增加^[3]。倒伏会破坏玉米的冠层结构，影响光合作用，阻碍水分和养分的运输。有研究指出，每增加 2% 的倒伏就会引起 1% 的减产^[4]，给玉米生产造成严重损失。

近年来，作物化学调控技术已成为中国粮食高产稳产及优质栽培的重要组成部分^[5]。研究表明，乙烯利在提高玉米抗倒伏能力的同时，会影响其穗部发育，导致减产^[6-7]，同时在生产中需将乙烯利制成强酸性制剂使用，增加了安全隐患^[8]。因此，迫切需要一种既安全又能抗倒伏、增产的新型植物生长调节剂，用于调控玉米生长发育，以发挥群体优势，提高玉米产量，解决产量、密度和倒伏之间的矛盾。

冠菌素 (coronatine, COR) 是由丁香假单胞菌部分致病变种产生并分泌的次生代谢产物^[9]，是一种天然活性物质，具有调控植株生长和增强植株抗逆性等生理功能^[10]。Sakai^[11]研究发现，COR 可以抑制小麦根的伸长；Feys 等^[12]在研究 COR 不敏感突变体 COI 1 时发现，COR 具有抑制拟南芥幼苗生长和根伸长的作用；卫晓轶等^[8]研究表明，COR 具有延缓玉米节间伸长的效应。COR 是通过微生物发酵生产的天然化合物，用量少且效果显著，是一种潜力极大的环境友好型植物生长调节剂^[13]。因此，本研究选用 2 个玉米品种 (郑单 958, 中株中穗；先玉 335, 大株大穗)，采用不同浓度的 COR 处理，通过比较其产量、植株形态结构和节间力学特征变化，以期探明 COR 对不同基因型玉米抗倒伏能力及产量的影响，筛选出防倒增产

的最适 COR 浓度，为将 COR 开发作为防倒增产的植物生长调节剂提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验于 2016—2017 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) 进行。该地区属于温带季风气候，年平均降雨量 562 mm，主要分布在 6—8 月份。全年光照时数 2 724.8 h，年平均气温 12.9 °C，无霜期 201 d。试验地 0~20 cm 土层含有机质 12.51 g/kg，全氮 0.81 g/kg，有效磷 44.32 mg/kg，速效钾 90.48 mg/kg。

1.2 试验设计

供试玉米 *Zea mays* L. 品种为郑单 958 和先玉 335，分别于 2016 年 4 月 30 日和 2017 年 4 月 28 日人工播种，种植密度为 67 500 株/hm²，行距 0.6 m，每穴 3 粒；于三叶期定苗，9 月上旬收获。试验采用双因素完全随机区组设计，每处理 3 个重复，小区面积 60 m²。冠菌素 (coronatine, COR) 原药由中国农业大学植物生长调节剂教育部工程研究中心提供，经高效液相色谱标定其纯度为质量分数 80%，用甲醇稀释配成 60 mg/L 的母液，使用时用水稀释至所需浓度。2016 年浓度设置为 0 (清水对照)、0.01、0.1 和 1 $\mu\text{mol/L}$ ，2017 年根据 2016 年试验结果将浓度调整为 0 (清水对照)、1 和 10 $\mu\text{mol/L}$ ，在八展叶时于叶面喷施，喷液量为 450 L/hm²。其他田间管理按照当地常规栽培措施进行。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 产量及产量构成因子 于玉米成熟期在每小区采集中间相邻 2 行 5 m 长区域内的全部果穗，用于测定玉米产量和产量构成因子相关指标。考察穗长、秃尖长、穗粗、行数和行粒数等果穗性状，以 14% 含水量折算玉米籽粒产量。

1.3.2 农艺性状 于吐丝期在每小区随机取玉米 5 株, 采用长宽系数法^[4]调查单株叶面积; 于成熟期在每小区随机取玉米 5 株, 测量株高及穗位高, 剥去叶鞘, 用游标卡尺测量穗下节间长度及最大直径。

1.3.3 节间抗折断力 于成熟期在每小区随机取玉米 5 株, 剥去叶鞘, 用茎秆强度测试仪 (YYD-1, 浙江托普仪器有限公司, 中国) 测定穗下节间抗折断力。

1.4 数据分析

采用 SAS 9.0 (SAS Institute, Cary, NC) 软件, 运用单变量方差分析法评估各处理对玉米籽粒产量及抗倒伏能力的影响。将品种处理或 COR 浓度处理数据进行合并, 对数据进行同质性检验后用单变量方差分析法研究品种和 COR 不同浓度处理对各指标的影响。

2 结果与分析

2.1 冠菌素对玉米产量及产量构成因子的影响

如表 1 所示, 2016 年品种间的产量、穗粒数和千粒重差异极显著, 与郑单 958 相比, 先玉 335 产量、穗粒数和千粒重分别提高了 23.0%、9.9% 和 11.4%; 不同浓度 COR 处理间产量、穗数、穗粒数和千粒重差异显著, 与对照相比, 0.01、0.1 和 1 $\mu\text{mol/L}$ COR 处理后玉米产量分别增加了 3.2%、4.6% 和 11.3%, 穗数分别增加了 2.9%、8.2% 和 13.0%, 穗粒数分别增加了 1.0%、3.7% 和 4.7%, 千粒重分别增加了 2.1%、2.3% 和 3.7%。2017 年与 2016 年相比, 先玉 335 较郑单 958 千粒重降低了 9.7%。不同浓度 COR 处理间玉米产量、穗数和千粒重差异显著, 而穗粒数无显著差异。其中 10 $\mu\text{mol/L}$ COR 处理对郑单 958 产

表 1 冠菌素对玉米产量及产量构成因子的影响 ($n = 3$)

Table 1 Maize yield and yield components in response to COR ($n = 3$)

年份 Year	品种 Cultivar	浓度 Concentration/ ($\mu\text{mol/L}$)	产量 Grain yield/ (t/hm^2)	穗数 Ears/ hm^2	穗粒数 Grain numbers per ear	千粒重 1000-grain weight/g	
2016	先玉 335 Xianyu335	0 (CK)	11.64 \pm 0.43 b	58 328 \pm 4 194 a	546.9 \pm 9.81 a	371.2 \pm 3.90 b	
		0.01	12.31 \pm 0.16 b	58 328 \pm 1 924 a	547.6 \pm 8.22 a	381.1 \pm 1.99 a	
		0.1	12.52 \pm 0.23 b	63 883 \pm 2 222 a	567.1 \pm 2.40 a	381.7 \pm 0.90 a	
		1	13.64 \pm 0.42 a	67 216 \pm 2 003 a	568.3 \pm 4.63 a	389.0 \pm 1.96 a	
	郑单 958 Zhengdan 958	0 (CK)	10.03 \pm 0.53 a	57 217 \pm 2 003 b	493.6 \pm 8.90 a	336.9 \pm 2.57 a	
		0.01	10.07 \pm 0.45 a	60 550 \pm 1 111 ab	502.8 \pm 13.64 a	341.8 \pm 4.85 a	
		0.1	10.17 \pm 0.20 a	61 105 \pm 1 111 ab	511.8 \pm 6.69 a	342.6 \pm 3.04 a	
		1	10.49 \pm 0.32 a	63 327 \pm 1 924 a	521.3 \pm 1.15 a	345.3 \pm 1.10 a	
变异来源 Source of variation							
品种 Cultivar (H)			***	NS	***	***	
浓度 Concentration (C)			*	*	*	**	
品种 \times 浓度 H \times C			NS	NS	NS	NS	
2017	先玉 335 Xianyu 335	0 (CK)	10.80 \pm 0.09 a	66 114 \pm 556 a	608.6 \pm 12.71 a	281.5 \pm 3.39 b	
		1	11.02 \pm 0.06 a	66 114 \pm 556 a	613.4 \pm 9.49 a	284.9 \pm 2.99 b	
		10	10.99 \pm 0.10 a	67 226 \pm 556 a	609.6 \pm 3.14 a	295.1 \pm 0.49 a	
	郑单 958 Zhengdan 958	0 (CK)	9.31 \pm 0.11 a	65 559 \pm 2 421 a	478.1 \pm 3.28 a	315.2 \pm 2.44 a	
		1	9.69 \pm 0.16 a	65 559 \pm 2 003 a	487.3 \pm 4.74 a	318.8 \pm 4.01 a	
		10	8.12 \pm 0.03 b	57 225 \pm 1 470 b	485.4 \pm 2.16 a	321.6 \pm 1.09 a	
	变异来源 Source of variation						
	品种 Cultivar (H)			***	**	***	***
浓度 Concentration (C)			***	*	NS	**	
品种 \times 浓度 H \times C			***	*	NS	NS	

注: 同列数据后相同字母表示差异不显著, *、** 和 *** 分别表示在 0.05、0.1 和 0.001 上显著水平, NS 表示无显著差异 ($P > 0.05$)。

Note: The data within the same column followed by the same letter are not significantly different. * Significant at $P < 0.05$. ** Significant at $P < 0.01$.

*** Significant at $P < 0.001$. NS, no significant ($P > 0.05$).

量存在负效应,显著降低了穗数,与对照相比产量降低了12.8%;而对先玉335有增产效应,与对照相比产量增加了1.8%。品种和浓度之间的交互效应在2017年的产量和穗数上差异显著,而在2016年的产量、穗数、穗粒数和千粒重上均不显著。

2.2 冠菌素对玉米果穗性状的影响

从表2可以看出,2016年,不同品种间除穗粗外,穗长、秃尖长、行数和行粒数间差异均显著;不同浓度间无显著差异;品种和浓度间无交互效应;经1 $\mu\text{mol/L}$ COR处理后,玉米穗秃尖长与对照相比降低了17.9%,行数增加了2.6%。

2017年,不同品种间穗长、穗粗、行数和行粒数差异显著;浓度间穗长差异显著;品种和浓度在穗长上存在显著的交互效应;10 $\mu\text{mol/L}$ COR

处理对郑单958存在负效应,可显著降低玉米穗长,与对照相比降低了7.1%。

2.3 冠菌素对玉米株高和穗位高的影响

如图1所示,与对照相比,喷施COR显著降低了玉米的株高和穗位高,且随COR浓度的升高差异越显著。2016年喷施不同浓度COR后,玉米株高和穗位高处理间均表现为1 $\mu\text{mol/L}$ < 0.1 $\mu\text{mol/L}$ < 0.01 $\mu\text{mol/L}$ < Control。2017年,1 $\mu\text{mol/L}$ COR处理的先玉335和郑单958株高分别比对照降低了6.7%和12.0%,10 $\mu\text{mol/L}$ COR处理的分别降低了7.0%和20.8%(图1B);1 $\mu\text{mol/L}$ COR处理的先玉335和郑单958穗位高分别比对照降低了19.9%和18.2%,10 $\mu\text{mol/L}$ COR处理的分别降低了27.3%和36.4%(图1D)。从株高和穗位高的降低程度来看,郑单958对COR的敏感性高于先玉335。

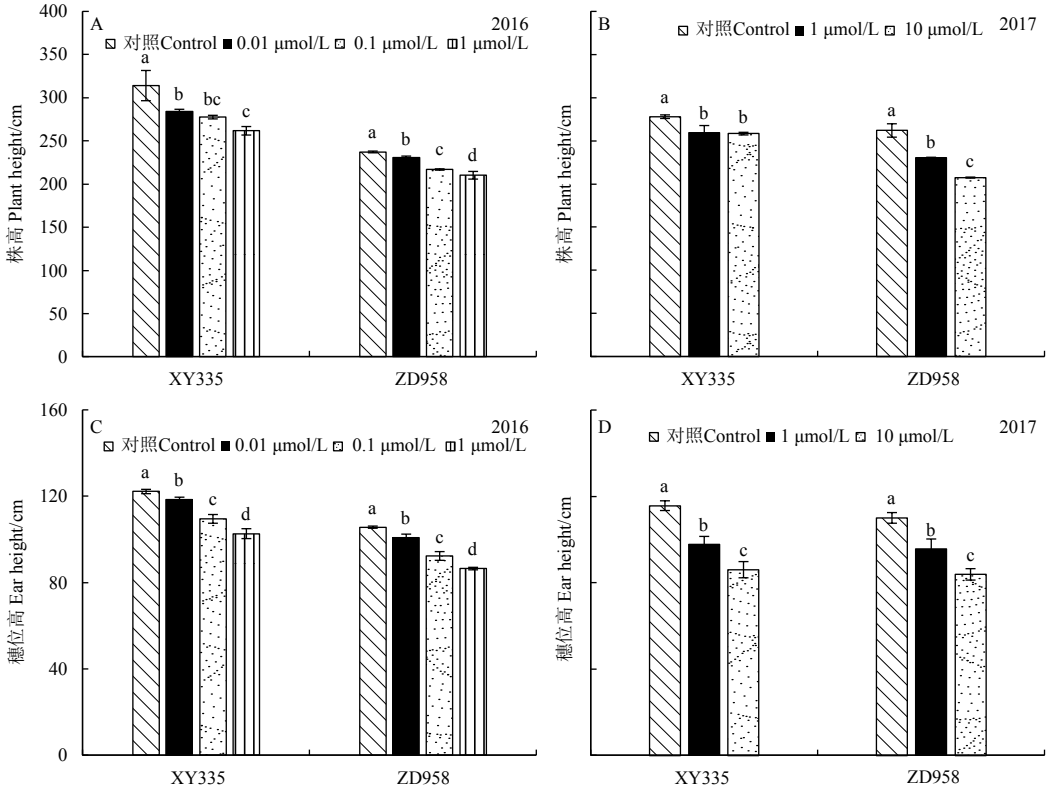
表2 冠菌素对玉米果穗性状的影响

Table 2 Maize ear traits in response to COR

年份 Year	品种 Cultivar	浓度 Concentration/ ($\mu\text{mol/L}$)	穗长 Ear length/cm	秃尖长 Bare tip length/cm	穗粗 Ear diameter/mm	行数 Rows per ear	行粒数 Grains per row	
2016	先玉335 Xianyu 335	0 (CK)	18.1 \pm 0.36 a	2.18 \pm 0.06 a	47.3 \pm 0.28 a	15.9 \pm 0.13 b	34.3 \pm 0.55 a	
		0.01	18.8 \pm 0.17 a	1.88 \pm 0.02 ab	47.7 \pm 0.37 a	16.4 \pm 0.35 ab	34.7 \pm 0.41 a	
		0.1	18.5 \pm 0.21 a	1.92 \pm 0.12 ab	47.8 \pm 0.24 a	16.4 \pm 0.12 ab	34.8 \pm 0.17 a	
		1	18.3 \pm 0.13 a	1.85 \pm 0.15 b	47.9 \pm 0.17 a	16.7 \pm 0.13 a	35.0 \pm 0.42 a	
	郑单958 Zhengdan 958	0 (CK)	16.6 \pm 0.12 a	1.50 \pm 0.16 a	47.2 \pm 0.40 a	15.1 \pm 0.18 a	33.3 \pm 0.25 a	
		0.01	17.0 \pm 0.43 a	1.46 \pm 0.11 a	47.2 \pm 0.48 a	15.1 \pm 0.07 a	33.3 \pm 0.78 a	
		0.1	16.8 \pm 0.28 a	1.28 \pm 0.18 a	47.9 \pm 0.22 a	15.2 \pm 0.01 a	33.2 \pm 0.61 a	
		1	17.2 \pm 0.28 a	1.27 \pm 0.06 a	47.8 \pm 0.19 a	15.1 \pm 0.13 a	33.5 \pm 0.38 a	
变异来源 Source of variation								
品种 Cultivar (H)			***	***	NS	***	**	
浓度 Concentration (C)			NS	NS	NS	NS	NS	
品种 \times 浓度 H \times C			NS	NS	NS	NS	NS	
2017	先玉335 Xianyu 335	0 (CK)	17.7 \pm 0.08 a	0.69 \pm 0.03 a	44.8 \pm 0.16 a	16.4 \pm 0.23 a	37.9 \pm 0.63 a	
		1	18.2 \pm 0.30 a	0.80 \pm 0.03 a	44.2 \pm 0.32 a	16.5 \pm 0.07 a	38.6 \pm 1.14 a	
		10	17.9 \pm 0.24 a	0.69 \pm 0.06 a	44.7 \pm 0.54 a	16.4 \pm 0.15 a	38.3 \pm 0.38 a	
	郑单958 Zhengdan 958	0 (CK)	16.3 \pm 0.18 a	0.65 \pm 0.16 a	46.2 \pm 0.63 a	15.5 \pm 0.27 a	32.2 \pm 0.49 a	
		1	16.3 \pm 0.15 a	0.87 \pm 0.07 a	45.7 \pm 0.59 a	15.3 \pm 0.37 a	32.4 \pm 0.39 a	
		10	15.1 \pm 0.15 b	0.57 \pm 0.14 a	47.3 \pm 1.09 a	15.3 \pm 0.07 a	31.8 \pm 0.26 a	
	变异来源 Source of variation							
	品种 Cultivar (H)			***	NS	**	***	***
浓度 Concentration (C)			**	NS	NS	NS	NS	
品种 \times 浓度 H \times C			*	NS	NS	NS	NS	

注: 同列数据后相同字母表示差异不显著, *、**和***分别表示在0.05、0.1和0.001上的显著水平, NS表示无显著差异 ($P > 0.05$)。

Note: The data within the same column followed by the same letter are not significantly different. * Significant at $P < 0.05$, ** Significant at $P < 0.01$, *** Significant at $P < 0.001$. NS, no significant ($P > 0.05$).



柱上不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

Different letters on the column mean significant difference at $P < 0.05$.

图 1 冠菌素对玉米株高和穗位高的影响

Fig. 1 Effects of COR on the plant height and ear height of maize

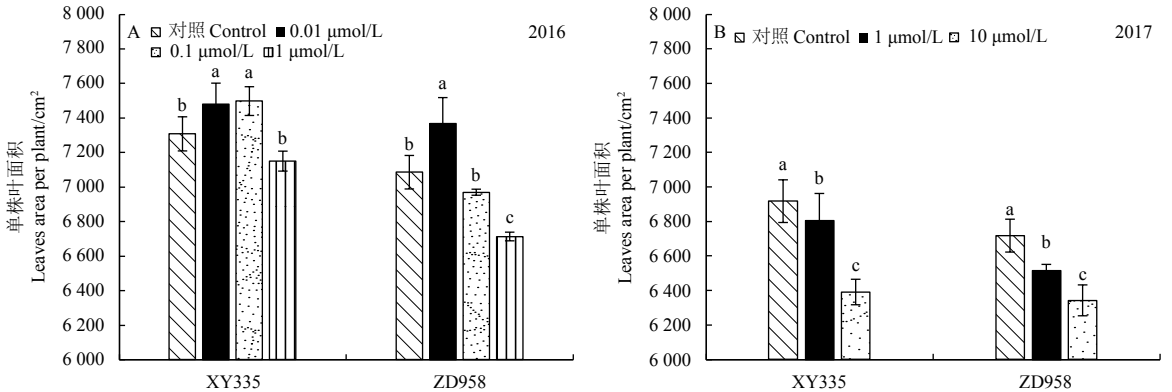
2.4 冠菌素对玉米单株叶面积的影响

从图 2 可以看出: 低浓度 COR 处理可增加玉米单株叶面积, 高浓度则降低其单株叶面积, 且品种间存在差异。其中 1 和 10 μmol/L COR 处理均与对照差异显著。单株叶面积降低主要是由于喷施高浓度 COR 使得晚发育叶片面积减小, 从而避免了高密度条件下叶片的冗余, 提高了群体的

光截获能力, 使得光合能力增强, 为合理密植提供了条件。

2.5 冠菌素对玉米节间长度的影响

COR 处理显著抑制了玉米穗下第 8~14 节间伸长, 且随着 COR 浓度的升高抑制效应越显著 (图 3)。2016 年, 1 μmol/L COR 处理后先玉 335 和郑单 958 穗下第 8~14 节间长度与对照相比



柱上不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

Different letters on the column mean significant difference at $P < 0.05$.

图 2 冠菌素对玉米单株叶面积的影响

Fig. 2 Effects of COR on the leaves area per plant of maize

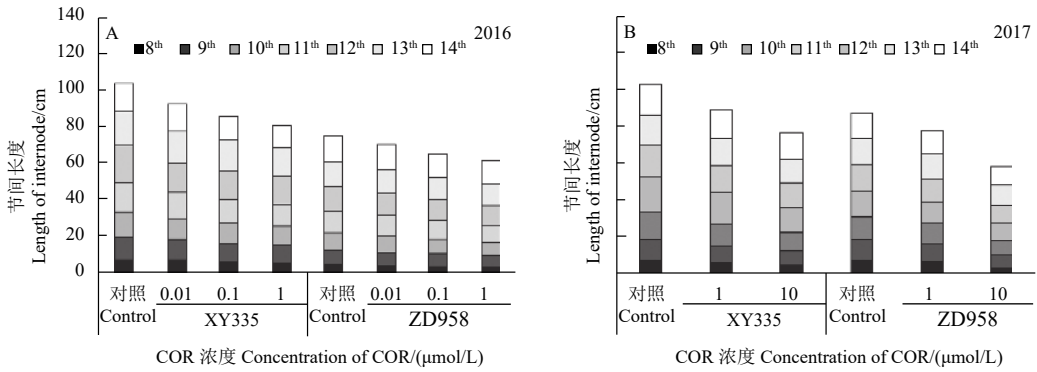


图 3 冠菌素对玉米第 8~14 节间长度的影响

Fig. 3 Effects of COR on the length of the 8th-14th internodes of maize

差异达到极显著水平；2017 年，10 μmol/L COR 处理后先玉 335 和郑单 958 穗下第 8~14 节间长度与对照差异极显著。穗下第 8~14 节间长度降低，使得玉米的穗位高和重心降低，提高了抗倒伏能力。

2.6 冠菌素对玉米节间最大直径的影响

结果见表 3。品种间比较，经 COR 处理后，先玉 335 第 8~14 节间最大直径显著低于郑单 958；COR 处理对玉米穗下第 8~14 节间最大直径影响显著，且随着 COR 浓度的升高处理间差异越

表 3 冠菌素对玉米第 8~14 节间最大直径的影响

Table 3 Effects of COR on the maximum diameter of the 8th-14th internodes of maize

年份 Year	品种 Cultivar	浓度 Concentration /(μmol/L)	节间最大直径 Maximum diameter of the internodes/mm							
			8 th	9 th	10 th	11 th	12 th	13 th	14 th	
2016	先玉 335 Xianyu 335	0 (CK)	23.34 ± 0.16 b	22.03 ± 1.08 b	22.51 ± 0.12 c	20.42 ± 0.50 b	20.21 ± 0.56 b	18.65 ± 0.14 b	15.10 ± 0.44 b	
		0.01	24.08 ± 0.19 a	23.43 ± 0.25 ab	23.09 ± 0.25 b	21.83 ± 0.16 a	20.72 ± 0.24 b	19.10 ± 0.21 ab	15.33 ± 0.19 b	
		0.1	24.12 ± 0.29 a	23.58 ± 0.22 ab	23.78 ± 0.12 a	22.15 ± 0.13 a	21.21 ± 0.05 ab	19.42 ± 0.38 ab	15.95 ± 0.27 a	
		1	24.44 ± 0.08 a	23.97 ± 0.09 a	23.94 ± 0.14 a	22.41 ± 0.12 a	21.82 ± 0.25 a	19.69 ± 0.20 a	16.06 ± 0.14 a	
	郑单 958 Zhengdan 958	0 (CK)	23.73 ± 0.05 b	23.29 ± 0.55 b	22.64 ± 0.25 b	21.92 ± 0.52 c	20.79 ± 0.17 c	19.45 ± 0.42 c	18.95 ± 0.25 c	
		0.01	23.86 ± 0.42 b	23.47 ± 0.37 b	23.21 ± 0.21 b	22.42 ± 0.08 bc	21.50 ± 0.38 bc	20.09 ± 0.47 bc	19.89 ± 0.20 b	
		0.1	24.37 ± 0.05 b	24.36 ± 0.11 ab	24.29 ± 0.29 a	23.17 ± 0.13 ab	22.25 ± 0.28 ab	21.11 ± 0.06 b	20.35 ± 0.30 b	
		1	25.30 ± 0.11 a	25.04 ± 0.21 a	24.91 ± 0.09 a	23.47 ± 0.29 a	23.20 ± 0.30 a	22.28 ± 0.17 a	21.17 ± 0.20 a	
变异来源 Source of variation										
品种 Cultivar (H)			*	*	**	***	***	***	***	
浓度 Concentration (C)			***	**	***	***	***	***	***	
品种 × 浓度 H × C			NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	
2017	先玉 335 Xianyu 335	0 (CK)	23.62 ± 0.40 b	22.67 ± 0.41 b	21.47 ± 0.40 b	20.53 ± 0.31 b	19.44 ± 0.38 b	17.83 ± 0.03 c	15.11 ± 0.25 b	
		1	24.11 ± 0.30 ab	23.59 ± 0.20 b	23.01 ± 0.16 a	21.58 ± 0.51 ab	20.50 ± 0.26 a	18.71 ± 0.24 b	16.67 ± 0.25 a	
		10	25.09 ± 0.36 a	24.76 ± 0.14 a	23.83 ± 0.09 a	22.15 ± 0.24 a	21.17 ± 0.26 a	19.77 ± 0.19 a	17.47 ± 0.27 a	
	郑单 958 Zhengdan 958	0 (CK)	27.79 ± 0.27 a	26.35 ± 0.25 b	25.17 ± 0.69 a	24.27 ± 0.14 b	22.41 ± 0.08 c	20.71 ± 0.53 a	18.65 ± 0.28 c	
		1	28.17 ± 0.16 a	27.76 ± 0.30 a	26.15 ± 0.53 a	24.83 ± 0.15 ab	23.16 ± 0.30 b	21.47 ± 0.40 a	19.93 ± 0.16 b	
		10	29.32 ± 0.78 a	28.69 ± 0.43 a	27.05 ± 0.39 a	25.48 ± 0.28 a	24.06 ± 0.16 a	22.06 ± 0.17 a	21.12 ± 0.32 a	
	变异来源 Source of variation									
	品种 Cultivar (H)			***	***	***	***	***	***	***
浓度 Concentration (C)			*	***	**	**	***	***	***	
品种 × 浓度 H × C			NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	

注：同列数据后相同字母表示差异不显著，*、** 和 *** 分别表示在 0.05、0.1 和 0.001 上的显著水平，NS 表示无显著差异 ($P > 0.05$)。

Note: The data within the same column followed by the same letter are not significantly different. * Significant at $P < 0.05$, ** Significant at $P < 0.01$, *** Significant at $P < 0.001$. NS, no significant ($P > 0.05$).

显著。2016年, 喷施 $1 \mu\text{mol/L}$ COR 后玉米第 8~14 节间最大直径分别比对照增加了 5.7%、8.2%、8.2%、8.3%、9.8%、10.2% 和 9.4%, 差异显著; 2017年, 喷施 $10 \mu\text{mol/L}$ COR 后玉米第 8~14 节间最大直径分别比对照增加了 5.8%、9.1%、9.1%、6.3%、8.0%、8.5% 和 14.3%, 差异也达到显著水平。

2.7 冠菌素对玉米节间抗折断力的影响

从图 4 可以看出: COR 处理可显著提高玉米穗下第 8~14 节间抗折断力, 但随着 COR 浓度升

高节间抗折断力逐渐增强, 与对照差异显著; 但随着节间位次的升高, 节间抗折断力逐渐降低; 品种间比较, 经 COR 处理后, 郑单 958 穗下第 8~14 节间抗折断力显著高于先玉 335。2016年, $1 \mu\text{mol/L}$ COR 处理的先玉 335 第 9 节间抗折断力与对照相比增加了 24.7%, 郑单 958 增加了 24.1%; 而 2017年, $10 \mu\text{mol/L}$ COR 处理的先玉 335 第 9 节间抗折断力与对照相比增加了 22.8%, 郑单 958 增加了 26.0%。说明 COR 处理提高了玉米的抗倒伏能力。

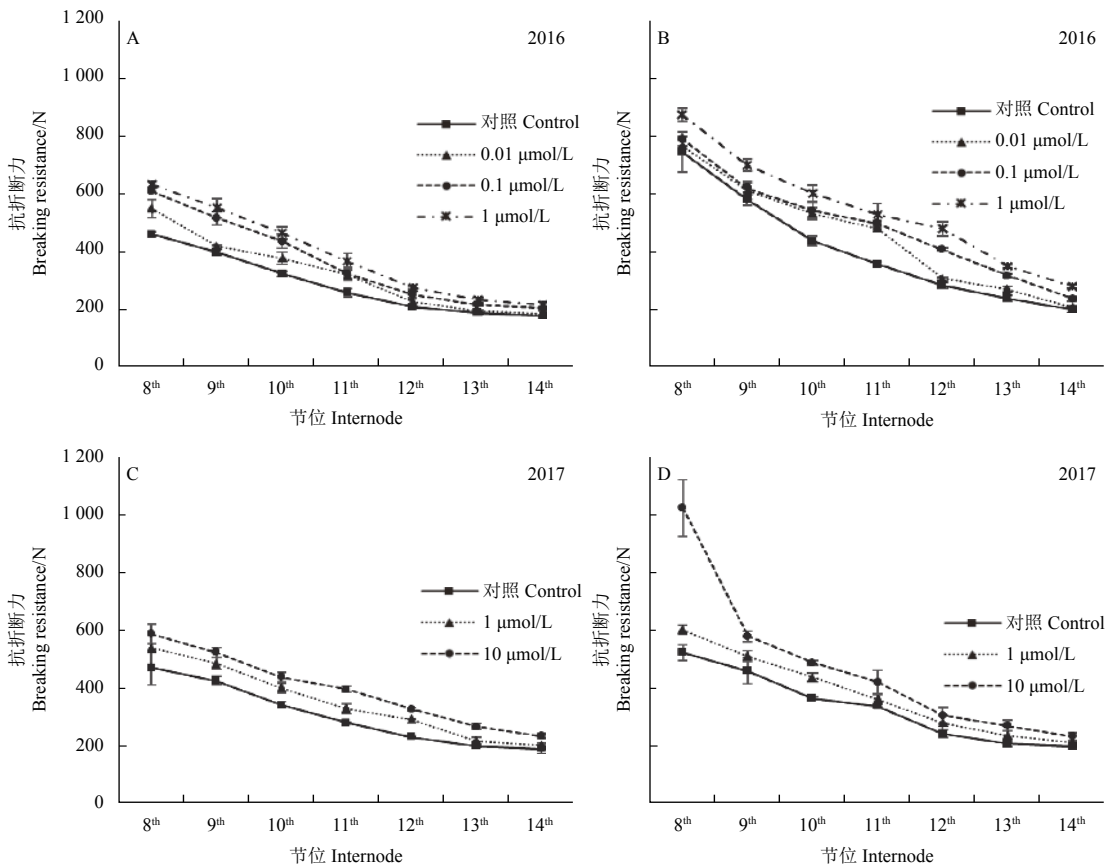


图 4 冠菌素对玉米穗下第 8~14 节间抗折断力的影响

Fig. 4 Effects of COR on the breaking resistance of the 8th-14th internodes of maize

3 讨论与结论

3.1 冠菌素对玉米抗倒伏的影响

玉米倒伏受到自然条件、栽培技术和品种本身特性等因素的多重影响^[15]。从植株形态分析, 株高和穗位高过高、茎秆强度弱等原因都会导致玉米抗倒伏能力下降, 从而使玉米容易发生倒伏^[16]。化控技术通过调控作物自身的内源激素系统, 改善作物株型和物质分配, 在作物防倒伏方面具有重要作用。研究表明, 喷施化学调控剂可以降低

玉米的株高和穗位高, 改变叶形, 塑造良好株型, 改善田间通风、透光条件, 降低高密度栽培下的空秆率, 增强抗倒伏能力, 是一项经济有效的措施^[17-19]。卫晓轶等研究报道, 乙烯利降低了玉米节间生长素和赤霉素的含量, 抑制了穗下第 1~6 节间的伸长, 显著降低了穗位高, 从而提高了玉米的抗倒伏能力^[20]。Martin 等^[21]研究表明, 穗下第 3 节间 (即第 9 节间) 粗度与倒伏呈显著负相关。叶德练等^[22]研究发现, 玉米抗折断力与节

间最大直径显著正相关,而与基部节间长度显著负相关。

本研究结果表明, COR 处理显著降低了玉米株高,增加了穗下节间的最大直径,增强了节间抗折断力,从而增强了玉米茎秆的抗倒伏性能;同时 COR 处理显著缩短了穗下节间长度,降低了穗位高,增加了穗上节间长度,拉开了穗上部叶片的间距,减小了单株叶面积,缩短了营养和水分向地上部运输的距离,增加了运输横截面积,促进了产量的增加,并使得群体内光照充足,为合理密植及防倒伏创造了有利条件,但其作用机制尚待进一步研究。从抗倒伏能力、品种敏感性和产量性状来看,既能增强节间抗倒伏性能又能增加玉米产量的最适 COR 浓度先玉 335 为 $10\ \mu\text{mol/L}$, 郑单 958 为 $1\ \mu\text{mol/L}$ 。因此,在实际生产应用中,应根据玉米品种特性选择适宜的 COR 浓度。

2016 年和 2017 年的试验结果显示,在供试浓度范围内,随着 COR 浓度升高,影响效应越显著,且郑单 958 对 COR 的敏感性高于先玉 335。COR 对玉米植株形态及抗折断力的影响与抗倒伏株型塑造目标十分吻合,能有效改善茎秆的形态特征和机械特性,从而提高玉米的抗倒伏能力。

3.2 冠菌素对玉米产量的影响

Kharitononkov 等^[23]报道,乙烯利及其复配剂能够降低植株高度和穗位高度,缓解玉米倒伏,但高浓度的乙烯利会影响雌穗发育,产生小穗和秃尖瘪粒,降低穗粒数和千粒重,造成不同程度的减产,只有在倒伏大发生年份才能发挥其增产效应。张子学等^[7]研究发现,乙烯利不仅会抑制营养器官的生长,而且会抑制生殖器官的生长,尤其是造成玉米果穗变小,最终导致单株产量下降。乙烯利对玉米产量的负效应及其制剂在运输和保存上存在的安全隐患,限制了其在缓解作物倒伏上的广泛应用。

本研究结果表明, COR 处理不仅能够增强玉米植株的抗倒伏性能,而且适宜浓度的 COR 可增加玉米的产量、穗数、穗粒数和千粒重,降低秃尖长度。2016 年和 2017 年的试验证明,与对照相比, $1\ \mu\text{mol/L}$ COR 处理后玉米产量、穗数、穗粒数和千粒重差异显著;2017 年增加 COR 浓度至 $10\ \mu\text{mol/L}$, 对郑单 958 产量产生了负效应,可能与先玉 335 和郑单 958 对 COR 的敏感性不同有关,同时由于 2017 年青枯病的发生,以及气候条

件和栽培管理技术等的影响,导致了 2017 年与 2016 年玉米产量及植株性状上的差异。因此建议,在 COR 推广应用前应进行重复试验进行验证,同时应增加供试品种的种类,对品种敏感性进一步进行验证。

参考文献 (Reference):

- [1] 王泳超,孟瑶,顾万荣,等. DCPTA 与 CCC 复配对寒地春玉米根系生长及茎秆农艺性状的影响[J]. 华北农学报, 2014, 29(2): 156-160. WANG Y C, MENG Y, GU W R, et al. Effects of mixed compound of DCPTA and CCC on root growth and stem agronomic traits of spring maize in cold area[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2014, 29(2): 156-160.
- [2] 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. ZHANG Q, ZHANG M C, LIU M, et al. Interaction of nitrogen fertilizer and plant growth regular on plant morphology and yield in spring maize of cold region[J]. J China Agric Univ, 2014, 19(5): 29-37.
- [3] 勾玲,黄建军,张宾,等. 群体密度对玉米茎秆抗倒力学和农艺性状的影响[J]. 作物学报, 2007, 33(10): 1688-1695. GOU L, HUANG J J, ZHANG B, et al. Effects of population density on stalk lodging resistant mechanism and agronomic characteristics of maize[J]. Acta Agronomica Sinica, 2007, 33(10): 1688-1695.
- [4] 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. CHENG F L, DU X, LIU M X, et al. Lodging of summer maize and the effects on grain yield[J]. J Maize Sci, 2011, 19(1): 105-108.
- [5] 董学会,段留生,孟繁林,等. 30% 己·乙水剂对玉米产量和茎秆质量的影响[J]. 玉米科学, 2006, 14(1): 138-140. DONG X H, DUAN L S, MENG F L, et al. Effects of spraying 30% DTA-6. ethephon solution on yield and straw quality of maize[J]. J Maize Sci, 2006, 14(1): 138-140.
- [6] 赵久然,郭景伦,郭强,等. 乙烯类药剂处理对玉米果穗发育及穗粒数的影响[J]. 北京农业科学, 1998(4): 1-3. ZHAO J R, GUO J L, GUO Q, et al. Effects of treatment with ethylene agents on ear development and grain number of maize[J]. Beijing Agric Sci, 1998(4): 1-3.
- [7] 张子学,朱仕燕,李文阳,等. 化控剂——乙烯利对玉米植株主要性状和产量的影响[J]. 中国农学通报, 2014, 30(3): 209-213. ZHANG Z X, ZHU S Y, LI W Y, et al. Effect of chemical control agent—ethephon on main characters and yield of maize[J]. Chin Agric Sci Bull, 2014, 30(3): 209-213.
- [8] 卫晓轶,张明才,李召虎,等. 冠菌素对玉米节间伸长和产量性状的影响[J]. 科技导报, 2011, 29(20): 63-67. WEI X Y, ZHANG M C, LI Z H, et al. Effect of coronatine on internode elongation and yield characters of maize[J]. Sci Technol

- Rev, 2011, 29(20): 63-67.
- [9] ICHIHARA A, SHIRAIISHI K, SATO H, et al. Structure of coronatine[J/OL]. *J Am Chem Soc*, 1977, 99(2): 636-637. <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ja00444a067>
- [10] 汪宝卿, 李召虎, 翟志席, 等. 冠菌素及其生理功能[J]. *植物生理学通讯*, 2006, 42(3): 503-510.
- WANG B Q, LI Z H, ZHAI Z X, et al. Coronatine and its physiological functions[J]. *Plant Physiol Commun*, 2006, 42(3): 503-510.
- [11] SAKAI R. Comparison of physiological activities between coronatine and indole-3-acetic acid to some plant tissues[J]. *Jpn J Phytopathol*, 1980, 46(4): 499-503.
- [12] FEYS B, BENEDETTI C E, PENFOLD C N, et al. *Arabidopsis* mutants selected for resistance to the phytotoxin coronatine are male sterile, insensitive to methyl jasmonate, and resistant to a bacterial pathogen[J]. *Plant Cell*, 1994, 6(5): 751-759.
- [13] UPPALAPATI S R, AYOUBI P, WENG H, et al. The phytotoxin coronatine and methyl jasmonate impact multiple phytohormone pathways in tomato[J]. *Plant J*, 2005, 42(2): 201-217.
- [14] XU C L, GAO Y B, TIAN B J, et al. Effects of ED4H, a novel plant growth regulator, on mechanical strength, stalk vascular bundles and grain yield of summer maize at high densities[J]. *Field Crops Res*, 2017, 200: 71-79.
- [15] 张木清. 作物抗旱分子生理与遗传改良[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- ZHANG M Q. Drought resistance molecular physiology and genetic improvement of crops[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [16] 李姝彤, 边大红, 何璐, 等. 黄淮海夏玉米倒伏及化控抗倒技术研究进展[J]. *玉米科学*, 2018, 26(3): 95-101.
- LI S T, BIAN D H, HE L, et al. Lodging characteristics of summer maize and chemical control research progresses preventing lodging in the north China plain[J]. *J Maize Sci*, 2018, 26(3): 95-101.
- [17] 徐丽娜, 黄收兵, 陈刚, 等. 玉米抗倒伏栽培技术的研究进展[J]. *作物杂志*, 2012(1): 5-8.
- XU L N, HUANG S B, CHEN G, et al. The research progress in anti-lodging cultivation techniques of maize[J]. *Crops*, 2012(1): 5-8.
- [18] 张旭环, 马英龙, 孟繁君, 等. 玉米化控技术要点[J]. *吉林农业*, 2010(12): 139-139.
- ZHANG X H, MA Y L, MENG F J, et al. Chemical control technology of maize[J]. *Jilin Agric*, 2010(12): 139-139.
- [19] 赵敏, 周淑新, 崔彦宏. 我国玉米生产中植物生长调节剂的应用研究[J]. *玉米科学*, 2006, 14(1): 127-131.
- ZHAO M, ZHOU S X, CUI Y H. Research and application of plant growth regulators on maize (*Zea mays* L.) in China[J]. *J Maize Sci*, 2006, 14(1): 127-131.
- [20] 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.
- WEI X Y, ZHANG M C, LI Z H, et al. Differences in responding sensitivity to ethephon among different maize genotypes[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(10): 1819-1827.
- [21] MARTIN G C, RUSSELL W A. Response of a maize synthetic to recurrent selection for stalk quality[J]. *Crop Sci*, 1984, 24(2): 331-337.
- [22] 叶德练, 王庆燕, 张钰石, 等. 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[J]. *中国农业大学学报*, 2015, 20(6): 1-8.
- YE D L, WANG Q Y, ZHANG Y S, et al. Study of ethephon and nitrogen rate in regulating the basal internode characteristics and breaking resistance of maize[J]. *J China Agric Univ*, 2015, 20(6): 1-8.
- [23] KHARITONENKOV A, WROBLEWSKI V J, KOESTER A, et al. The metabolic state of diabetic monkeys is regulated by fibroblast growth factor-21[J]. *Endocrinology*, 2007, 148(2): 774-781.

(责任编辑: 曲来娥)