

樊海潮, 顾万荣, 尉莉萍, 等. 植物生长调节剂增强玉米抗倒伏能力的机制[J]. 江苏农业学报, 2017, 33(2): 253-262.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2017.02.003

植物生长调节剂增强玉米抗倒伏能力的机制

樊海潮¹, 顾万荣¹, 尉莉萍¹, 王悦力¹, 孟瑶², 张立国³, 李晶¹, 魏湜¹

(1.东北农业大学农学院, 黑龙江 哈尔滨 150030; 2.黑龙江省农垦科学院, 黑龙江 哈尔滨 150038; 3.黑龙江省农业科学院玉米研究所, 黑龙江 哈尔滨 150086)

摘要: 为探究植物生长调节剂对玉米茎秆及根系性状的影响以及与倒伏率的关系, 本试验以东农 253 为试验材料, 在玉米 6 叶期喷施吨田宝和本实验室自配的 DCPTA 和 ETH 复配剂(KP), 以清水为对照, 分析其对玉米茎秆及气生根形态和质量性状的影响, 明确植物生长调节剂增强玉米抗倒伏能力的力学及物质积累机制。结果表明, 植物生长调节剂能降低植株高度、穗位高、穗高系数、基部节间长度、重心高度、倒伏率, 而茎粗、茎粗系数、穿刺强度、弯折强度、入土气生根条数、入土深度、直径和干质量显著增加。相关性分析结果表明, 株高、穗位高、重心高度、节间长度与倒伏率呈极显著正相关, 穿刺强度、弯折强度与倒伏率呈极显著负相关, 入土气生根相关性状都与倒伏率呈极显著负相关。说明 DCPTA 和 ETH 复配剂对玉米强茎促根的效果显著。

关键词: 植物生长调节剂; 茎秆性状; 气生根性状; 抗倒伏性; 物质积累

中图分类号: S513.01 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2017)02-0253-10

Mechanism of lodging resistance of maize improved by plant growth regulator

FAN Hai-chao¹, GU Wan-rong¹, YU Ju-ping¹, WANG Yue-li¹, MENG Yao², ZHANG Li-guo³, LI Jing¹, WEI Shi¹

(1. College of Agronomy, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. Heilongjiang Academy of Land Reclamation Sciences, Harbin 150038, China; 3. Maize Research Institute, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China)

Abstract: To investigate the effects of plant growth regulators on the stem and root traits of maize and its relationship with the lodging rate, Dongnong 253 was foliarly sprayed with the chemical regulator of Duntianbao and the mixture of DCP-TA and ETH at six-leaf stage, while the control was water-sprayed. The plant height, ear height, ear height coefficient, basal internode length, height of center of gravity and lodging rate were decreased with the application of plant growth regulators, while the stem diameter, stem diameter index, puncture strength, bending strength, the number, depth, diameter

and dry weight of aerial root in the soil were increased. The result of correlation analysis showed that the plant height, ear height, height of center of gravity, internode length were closely correlated with the actual lodging rate, the puncture strength and bending strength were negatively correlated with the actual lodging rate, and the related traits of aerial root in the soil were negatively correlated with the actual lodging rate. The effect of the mixture of

收稿日期: 2016-12-30

基金项目: 哈尔滨市应用技术与开发项目(2015RQXXJ046); 国家重点研发计划项目(2016YFD0300103); 黑龙江省青年科学基金项目(QC2015032); 黑龙江省博士后科研启动项目(LBH-Q16031); 东北农业大学“学术骨干”项目

作者简介: 樊海潮(1991-), 男, 山东单县人, 硕士研究生, 主要从事玉米高产栽培技术研究。(E-mail) fanhaichao91@163.com

通讯作者: 顾万荣, (E-mail) wanronggu@163.com

DCPTA and ETH on strengthening stem and promoting root was remarkable.

Key words: plant growth regulator; stem trait; aerial root trait; lodging resistance; material accumulation

增加种植密度是玉米获得高产的重要途径之一^[1-4]。但在生产上,种植密度过大将导致冠层郁闭,群体内光分布不合理,导致光合性能降低,空秆倒伏现象严重,给玉米的高产、稳产带来严重威胁^[5]。玉米的倒伏大体上可分为茎倒(茎折)和根倒 2 种类型^[6]。倒伏破坏了根系和茎秆的输导组织,影响水分及养分运输,产量损失可达 5%~20%,严重的达到 70% 以上^[7]。玉米的抗倒伏能力与茎粗、株高和穗位高具有极显著相关性^[8]。Pickett 等^[9]的研究结果表明,基部节间长度和茎秆质量等性状都与玉米抗倒伏性具有密切的关系。Zuber 等^[10]的研究结果表明,茎秆压碎强度与玉米的抗倒伏能力具有密切关系,是评价茎秆抗倒伏能力的重要指标。研究结果表明,在适宜栽培条件下,气生根数量越多、抗倒能力越强,气生根性状与玉米抗倒伏能力具有密切的关系^[11],根系干质量的增加也能提高抗倒伏能力^[12],玉米的抗倒性与根系干质量、节根条数、根系直径、气生根层数等呈正相关^[13-14]。丰光等^[8]对玉米株高、穗位高、茎粗、茎秆强度和入土气生根条数等植株性状与倒伏率进行通径分析,认为入土气生根条数对倒伏率影响最显著。

玉米抗倒伏研究是涉及到品种改良、栽培技术、田间管理、植物保护等多方面的系统工程。当前,生产上增强玉米抗倒伏的方式主要有采取抗倒伏玉米品种^[15],加强田间管理^[16-17](合理密植,科学施肥),加强病虫害防治^[18],使用植物生长调节剂^[19-22]等 4 个方面。利用植物生长调节剂增强玉米抗倒伏性是最经济有效的手段之一,目前田间植物生长调节剂使用面积不足玉米栽培面积的 5%,获得国家相关部门批准的正规化控产品也不多^[23]。目前已有研究表明,乙矮合剂、乙烯利和矮壮素等植物生长调节剂能够通过调节内源激素合成和代谢,达到降低株高、穗位高和重心高度,缩短节间长度,增加茎粗和单位长度节间干质量,增强茎秆基部抗折力,提高玉米茎秆的抗倒伏能力,降低倒伏率^[19-22,24-25]。本研究以黑龙江省广泛种植,植株高度相对较高的玉米品种东农 253 为试验材料,在 6 叶期分别喷施吨田宝及 DCPTA 和 ETH 复配剂,以

明确植物生长调节剂增强玉米抗倒伏能力的力学及物质积累机制,以期为黑龙江玉米化控防倒栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料处理

供试玉米品种为东农 253,由东北农业大学选育。

DCPTA 和 ETH 复配剂 KP(已获授权发明专利,ZL2013100517850,其活性成分为 DCPTA 25 g/L,ETH 38 g/L,基因激活剂为水杨酸 15 g/L,活性剂和展着剂为 Tween-20 10 g/L,防腐剂为山梨酸钾 0.4 g/L,溶剂为水,保持 pH 值在 4 左右)由东北农业大学农学院自行复配提供,植物生长调节剂吨田宝由黑龙江禾田丰泽兴农业科技开发有限公司提供。

试验于 2015—2016 年在东北农业大学向阳农场试验站进行,土质为黑钙土,前茬作物为马铃薯,20 cm 耕层的土壤基础肥力:全氮 1.70 g/L,速效钾 179.35 g/L,速效磷 65.34 g/L,有机质 25.25 g/L,碱解氮 118.21 g/L,土壤 pH 6.85。2 年试验分别于 4 月 25 日和 4 月 26 日播种,于 9 月 29 日和 9 月 28 日收获,种植密度每 1 hm² 7×10⁴ 株。试验设 2 个调节剂处理和 1 个对照(CK)。在玉米 6 叶期叶面均匀喷施,KP 施用浓度为 10 ml/L,吨田宝每 666.7 m² 用量 60 ml。试验采用随机区组设计,重复 3 次,共 9 个小区。每小区 10 行,长 8 m,行距 0.65 m,株距 0.22 m,面积 52 m²,共种植玉米 360 株。

基肥用量:尿素 100 kg/hm²、磷酸二铵 180 kg/hm²、硫酸钾 50 kg/hm²,播种时一次性施入,在拔节期追施尿素 100 kg/hm²,其他田间管理均按常规进行。

1.2 测定指标和方法

1.2.1 茎秆形态指标 株高和穗位高:在灌浆初期(8 月 3 日)选出具有代表性的植株,用塔尺测量所选植株自地表至雄穗顶端的高度和至植株穗位着生节的高度,单位以 cm 表示。

茎秆重心:在拔节期(7 月 5 日)、抽雄吐丝期(7 月 25 日)、灌浆初期(8 月 3 日)、乳熟期(8 月 24 日)和完熟期(9 月 28 日)分别测量茎秆基部至该茎

(带穗、叶和鞘)平衡支点的距离,单位以 cm 表示。

茎粗:在灌浆初期(8月3日)选出具有代表性的植株,用数字游标卡尺测量地上部第3节的直径,单位以 cm 表示。

节间长度:在拔节期(7月5日)和灌浆初期(8月3日)用数字游标卡尺测量地上部第1节间至第6节间各节间的长度,单位以 cm 表示。

茎粗系数^[26] = 茎粗/株高×100

穗高系数^[26] = 穗位高/株高×100

在拔节期(7月5日)、抽雄吐丝期(7月25日)、灌浆初期(8月3日)、乳熟期(8月24日)和完熟期(9月28日)分别记录玉米倒伏情况,按茎秆与地面夹角划分倒伏级别,0~2级的夹角依次为90.0~60.1°、60.0~30.1°和30.0~0°,0级不计入实际倒伏率,在完熟期调查实际倒伏率,倒伏率=倒伏株数/小区总株数×100%。

1.2.2 茎秆质量指标 穿刺强度:分别在拔节期(7月5日)、抽雄吐丝期(7月25日)、灌浆初期(8月3日)、乳熟期(8月24日)和完熟期(9月28日)5个生育时期,采用石家庄艾沃士科技有限公司生产的植物茎秆强度测定仪(型号 AWOS-SL04)对玉米第1、第3、第5节各节间上、中、下3部分进行3点穿刺强度测定,然后求平均值。

横折强度:分别在上述5个生育时期,用植物茎秆强度测定仪对玉米第3、第4、第5节各节间中部进行测定。

1.2.3 气生根性状指标 分别在玉米抽雄吐丝期、灌浆初期、乳熟期、完熟期4个生育时期选取生长一致且有代表性的植株5株进行调查和测量。

1.2.3.1 入土气生根条数 分别调查玉米地上第1层和第2层气生根条数。

1.2.3.2 入土气生根入土深度 用刻度尺测量玉米地上第1层气生根入土深度,每株测量3条气生根取平均值。

1.2.3.3 入土气生根直径 用数字游标卡尺测量地上第1层与土壤接触部位的直径,每株测量3条气生根取平均值。

1.2.3.4 入土气生根干质量 首先用剪刀把地上第1层和第2层气生根沿基部剪下,然后105℃杀青30 min,之后80℃烘干至恒质量后测定干质量。

1.3 数据分析

由于2年试验的结果一致性较好,本研究主要

以较为完整的2016年试验结果进行分析。采用Microsoft Office Excel 2003与SPSS V19.0软件进行数据整理及差异性分析。

2 结果与分析

2.1 植物生长调节剂对玉米田间倒伏率的影响

由表1可以看出,喷施KP处理的玉米植株未发生倒伏,喷施吨田宝处理的植株在乳熟期发生倒伏,一级倒伏率和二级倒伏率分别3.88%和0.38%,对照在抽雄吐丝期发生倒伏,一级倒伏率和二级倒伏率分别5.64%和26.48%,与喷施植物生长调节剂的植株相比,对照倒伏程度严重,吨田宝处理比KP处理倒伏程度严重。表明喷施植物生长调节剂的植株抗倒伏能力强,植株倒伏时间越早,倒伏程度越严重,实际倒伏率越大。

表1 植物生长调节剂对玉米田间倒伏率的影响

Table 1 Effect of plant growth regulator on field lodging rate of maize

| 处理 | 倒伏发生时期 | 倒伏分级 | 实际倒伏率(%) |
|-----|--------|------|----------|
| KP | 乳熟期 | 0 | 0 |
| 吨田宝 | 乳熟期 | 1 | 3.88 |
| | | 2 | 0.38 |
| CK | 抽雄吐丝期 | 1 | 5.64 |
| | | 2 | 26.48 |

KP:喷施KP;吨田宝:喷施吨田宝;CK:对照。按茎秆与地面夹角划分倒伏级别,0~2级的倒伏夹角依次为90.0~60.1°、60.0~30.1°和30.0~0°。

2.2 植物生长调节剂对玉米株高、穗位高及茎粗的影响

玉米降低株高、穗位高可以使玉米重心下移,有利于提高植株的抗倒伏能力。穗高系数和茎粗系数也是衡量植株抗倒伏能力的重要指标,穗高系数越小,茎粗系数越大,抗倒伏能力越强。从表2可以看出,与对照相比,植物生长调节剂处理后,玉米株高和穗位高均显著降低,KP处理的株高和穗位高比吨田宝处理显著降低。与对照相比,植物生长调节剂处理后,玉米茎粗显著增加,且KP处理比吨田宝处理显著增加。与对照相比,植物生长调节剂处理后,玉米穗高系数降低而茎粗系数升高,吨田宝处理的穗高系数与对照无明显差异,其余均达到显著水平。

表 2 植物生长调节剂对玉米株高、穗位高及茎粗的影响

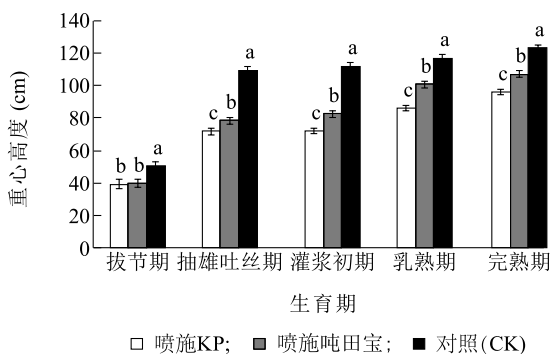
Table 2 Effect of plant growth regulator on plant height, ear height and stem diameter of maize

| 处理 | 株高 (cm) | 穗位高 (cm) | 茎粗 (cm) | 穗高系数 | 茎粗系数 |
|-----|--------------|--------------|------------|--------------|------------|
| KP | 258.29±6.64c | 97.16±1.46c | 2.78±0.02a | 37.62±1.56b | 1.08±0.14a |
| 吨田宝 | 275.02±8.55b | 109.56±4.78b | 2.64±0.07b | 39.84±1.24ab | 0.96±0.05b |
| CK | 304.19±5.51a | 122.47±6.16a | 2.39±0.06c | 40.26±2.42a | 0.79±0.02c |

KP: 喷施 KP; 吨田宝: 喷施吨田宝; CK: 对照。同一列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

2.3 植物生长调节剂对玉米重心高度的影响

从图 1 可以看出,随着玉米的生长发育,茎秆重心呈上升趋势。其中拔节期到抽雄吐丝期尤为明显。在玉米的 5 个生育时期,与对照相比,植物生长调节剂处理后,玉米重心均显著降低。其中 KP 处理在拔节期、抽雄吐丝期、灌浆初期、乳熟期、完熟期分别比对照降低 22.12%、34.14%、35.71%、26.50% 和 21.95%,吨田宝分别比对照降低 21.13%、28.20%、26.25%、14.02% 和 13.00%。在拔节期两处理之间差异不显著,其余 4 个生育时期 KP 处理均显著低于吨田宝处理。



不同小写字母表示同一生育时期不同处理间差异达 0.05 水平显著。

图 1 植物生长调节剂对玉米重心高度的影响

Fig.1 Effect of plant growth regulator on the height of center of gravity of maize

2.4 植物生长调节剂对玉米节间长度的影响

从表 3 可以看出,随着玉米的生长发育,玉米茎秆的各个节间长度不断增加。其中第 1、第 2、第 3 节间长度增加缓慢,第 4、第 5、第 6 节间长度增加迅速。在拔节期,随着节位的上升,玉米节间长度先升高后降低,KP 处理和吨田宝处理的玉米节间长度在第二节间处为最大值,CK 在第四节间处为最大值,

与对照相比,植物生长调节剂处理后,各节间长度均低于对照,KP 处理分别比对照降低 3.92%、8.48%、45.33%、53.66%、45.52% 和 42.42%,吨田宝处理分别比对照降低了 0.45%、8.86%、41.85%、52.11%、44.22% 和 32.53%。植物生长调节剂处理的节间长度和对照只有第 1 节间差异不显著,其余各节间的节间长度差异均达到显著水平,KP 处理和吨田宝处理的节间长度差异不显著。

在灌浆初期,节间长度随节位的不断上升而增加。与对照相比,植物生长调节剂处理后,各节间长度均低于对照,KP 处理的节间长度分别比对照降低了 32.74%、9.30%、46.37%、31.32%、24.32% 和 25.44%,吨田宝处理的节间长度分别比对照降低了 11.54%、10.05%、38.19%、21.34%、15.06% 和 23.76%。除第 2 节间的节间长度 KP 处理略高于吨田宝处理外,其余各节间的节间长度 KP 处理均低于吨田宝处理。

2.5 植物生长调节剂对玉米茎秆穿刺强度的影响

穿刺强度是判断玉米茎秆质量性状的重要指标,穿刺强度越大茎秆强度越强,抗倒伏能力越强。从图 2 可以看出,随着节间位置的升高,节间穿刺强度逐渐减小,第 1 节间>第 3 节间>第 5 节间。随着玉米的生长发育,茎秆第 1、第 3、第 5 节间穿刺强度均呈现先增大后减小的趋势,在灌浆初期穿刺强度最大,在拔节期最小。

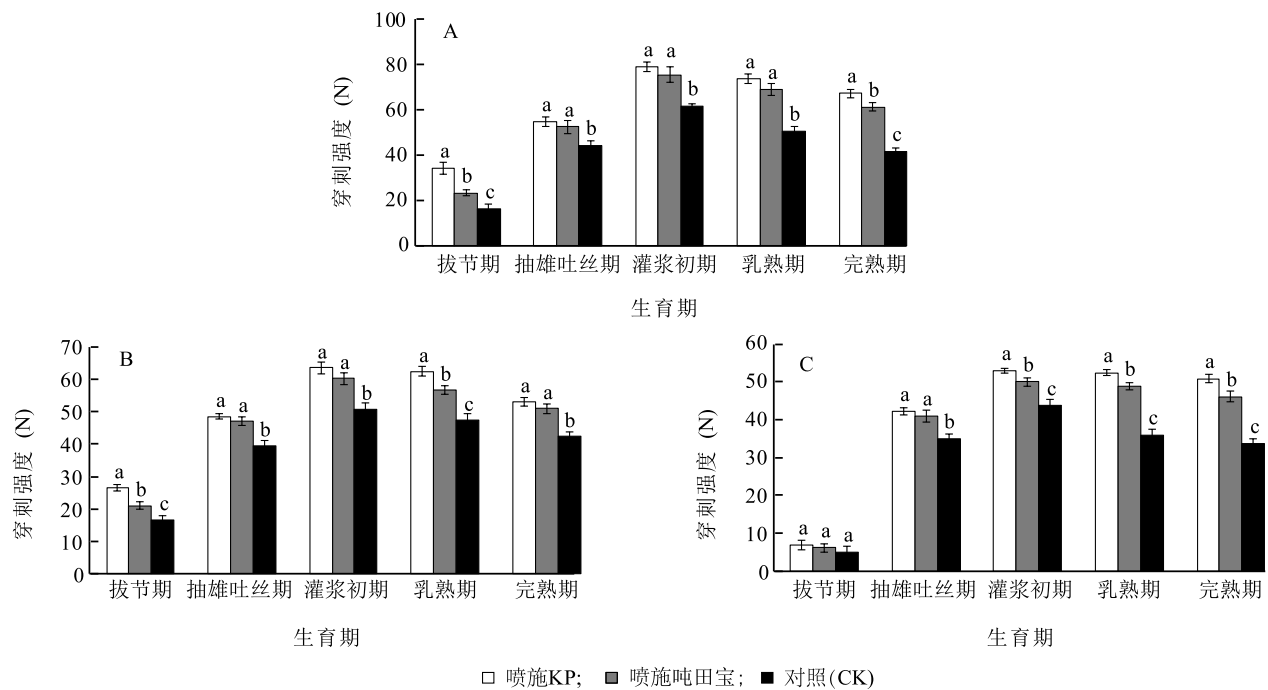
在各个生育时期,与对照相比,植物生长调节剂处理后,第 1、第 3、第 5 节间的茎秆穿刺强度均增大。其中第 1 节间的茎秆穿刺强度随玉米的生长发育,拔节期、抽雄吐丝期、灌浆初期、乳熟期、完熟期 KP 处理分别比对照提高 52.79%、19.00%、21.85%、31.40% 和 38.32%,吨田宝处理分别比对照提高 30.30%、15.36%、18.22%、22.35% 和 32.05%。第 3、第 5 节间穿刺强度的变化规律和第 1 节间类似。

表3 植物生长调节剂对玉米节间长度的影响

Table 3 Effect of plant growth regulator on internode length of maize

| 生育时期 | 处理 | 第1节间 | 第2节间 | 第3节间 | 第4节间 | 第5节间 | 第6节间 |
|------|-----|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 拔节期 | KP | 6.37±0.63a | 9.61±0.95b | 8.02±1.59b | 8.03±0.57b | 6.32±0.59b | 2.62±0.47b |
| | 吨田宝 | 6.60±0.79a | 9.57±0.25b | 8.53±0.90b | 8.30±1.11b | 6.47±0.91b | 3.07±0.40b |
| | CK | 6.63±0.12a | 10.50±0.58a | 14.67±0.21a | 17.33±1.17a | 11.60±1.80a | 4.55±0.95a |
| 灌浆初期 | KP | 6.41±0.21c | 9.75±0.14b | 8.33±0.45c | 14.65±0.31c | 17.08±0.81c | 18.58±0.37b |
| | 吨田宝 | 8.43±0.60b | 9.67±0.75b | 11.33±0.58b | 16.80±0.89b | 19.17±0.29b | 19.32±1.00b |
| | CK | 9.53±0.06a | 10.75±0.50a | 18.33±0.58a | 21.33±1.53a | 22.57±1.40a | 24.92±1.10a |

同一列同生育时期后不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。



A:第1节间;B:第3节间;C:第5节间。不同小写字母表示同一时期不同处理间差异达0.05水平显著。

图2 植物生长调节剂对玉米第1、第3、第5节间穿刺强度的影响

Fig.2 Effect of plant growth regulator on No. 1, No. 3, No. 5 internode puncture strength of maize

2.6 植物生长调节剂对玉米茎秆弯折强度的影响

弯折强度是衡量玉米茎秆机械强度的重要指标之一,与玉米茎秆抗倒伏能力密切相关。

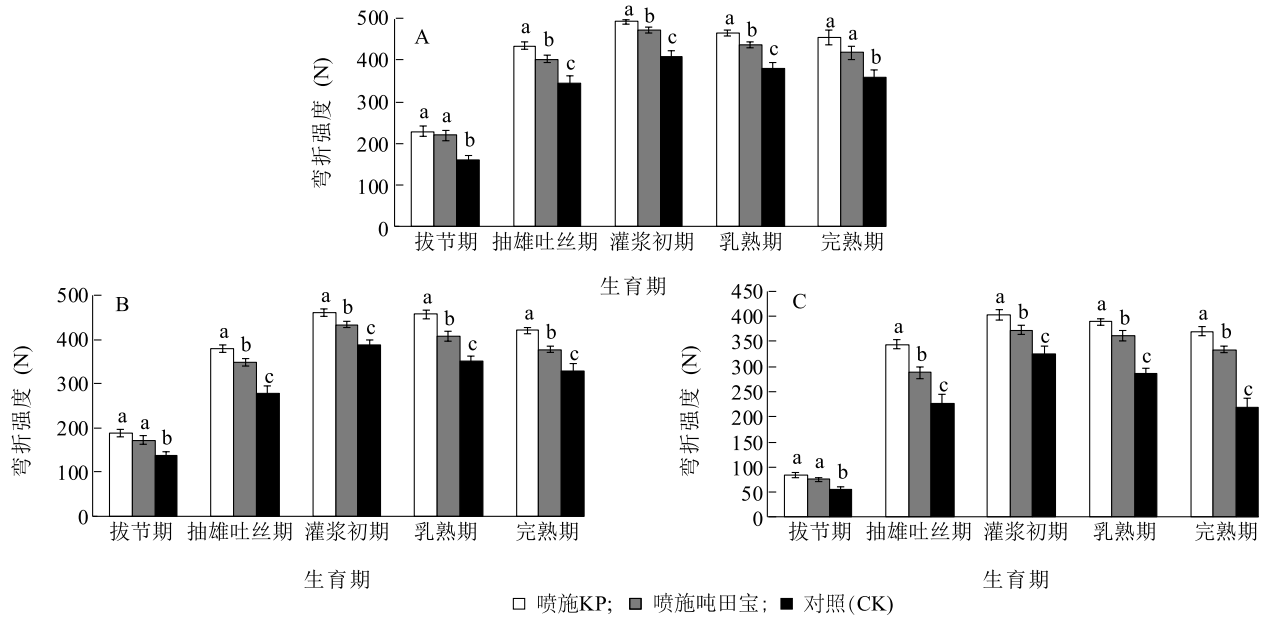
由图3可知,随着节位的升高,茎秆弯折强度逐渐降低,第3节间>第4节间>第5节间。随着玉米的生长发育,茎秆第3、第4、第5节间弯折强度均呈现先增大后减小的趋势,在灌浆初期达到最大值,随后逐渐减小。

在各个生育时期,与对照相比,植物生长调节剂处理后,第3、第4、第5节间的茎秆弯折强度均显著提高,其中第3节间的茎秆弯折强度在拔节期、抽雄吐丝期、灌浆初期、乳熟期、完熟期,KP处理分别比

对照提高了41.64%、25.17%、20.24%、22.13%和26.29%,吨田宝处理分别比对照提高了35.73%、16.19%、15.52%、14.57%和15.88%,KP处理的茎秆弯折强度均大于吨田宝处理,除拔节期外,其余各时期均达到显著水平,第4、第5节间弯折强度的变化规律和第1节间类似。

2.7 植物生长调节剂对玉米入土气生根条数的影响

植物生长调节剂不但对植株茎秆性状产生影响,而且对植株的根系性状也有显著的影响。气生根性状又是根系倒伏的重要性状,气生根的多少体现了根系活力和发达程度,气生根越多植株的抗倒伏能力越强^[27]。



A: 第 3 节间; B: 第 4 节间; C: 第 5 节间。不同小写字母表示同一时期不同处理间差异达 0.05 水平显著。

图 3 植物生长调节剂对玉米第 3、第 4、第 5 节间弯折强度的影响

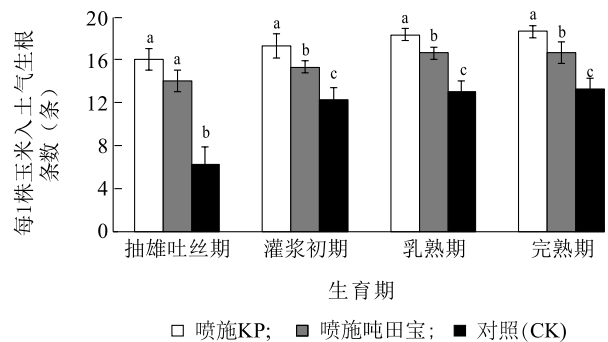
Fig.3 Effect of plant growth regulator on No. 3, No. 4, No. 5 internode bending strength of maize

从图 4 可以看出,在同一个生育时期,与对照相比,植物生长调节剂处理后,植株的入土气生根条数均显著增加。随着玉米的生长发育,抽雄吐丝期、灌浆初期、乳熟期、完熟期, KP 处理分别比对照增加 152.76%、40.55%、41.00% 和 40.06%, 吨田宝处理分别比对照增加 135.73%、16.19%、15.52% 和 14.57%。KP 处理入土气生根条数均大于吨田宝处理,在抽雄吐丝期,两处理差异不显著,其余各生育期差异均达到显著水平。

2.8 植物生长调节剂对玉米气生根入土深度的影响

气生根入土深度也是判断根系抗倒伏能力的重要指标,入土深度越深抗倒伏能力越强。从图 5 可以看出,随着玉米的生长发育,气生根入土深度不断增加,其中抽雄后到乳熟期增长迅速,乳熟后变化不明显。

在同一个生育期,与对照相比,植物生长调节剂处理后,植株的气生根入土深度均显著增加,抽雄吐丝期、灌浆初期、乳熟期、完熟期, KP 处理分别比对照增加 126.98%、53.59%、34.09% 和 33.36%, 吨田宝处理分别比对照增加 117.98%、50.05%、31.68% 和 30.93%。KP 处理玉米气生根入土深度均大于吨田宝处理,但两处理之间差异不显著。



不同小写字母表示同一时期不同处理间差异达 0.05 水平显著。

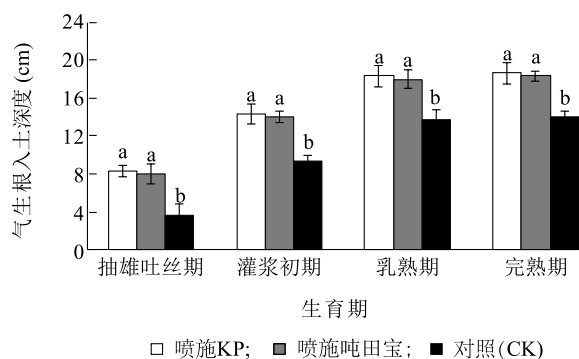
图 4 植物生长调节剂对玉米入土气生根条数的影响

Fig.4 Effect of plant growth regulator on the number of aerial root in the soil of maize

2.9 植物生长调节剂对玉米入土气生根直径的影响

气生根直径反映了气生根的粗细程度,间接地反映了气生根的弯折强度和抗倒伏能力,气生根直径越大,抗倒伏能力就越强。从图 6 可以看出,随着玉米的生长发育,气生根直径先增加后减小,在灌浆初期达到最大,随后缓慢减小。

从图 6 还可以看出,在各个生育期,与对照相比,植物生长调节剂处理后,植株的入土气生根直径均显著增加。抽雄吐丝期、灌浆初期、乳熟期、完熟期, KP 处理分别比对照增加 23.50%、25.59%、

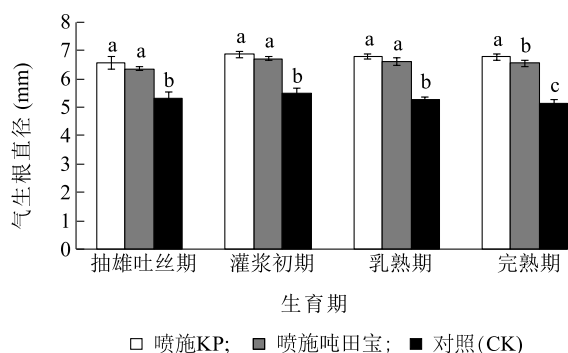


不同小写字母表示同一时期不同处理间差异达 0.05 水平显著。

图5 植物生长调节剂对玉米气生根入土深度的影响

Fig.5 Effect of plant growth regulator on the depth of aerial root in the soil of maize

28.65%和31.47%,吨田宝处理分别比对照增加19.55%、22.67%、25.43%和26.99%。除完熟期外,两处理之间差异不显著。



不同小写字母表示同一时期不同处理间差异达 0.05 水平显著。

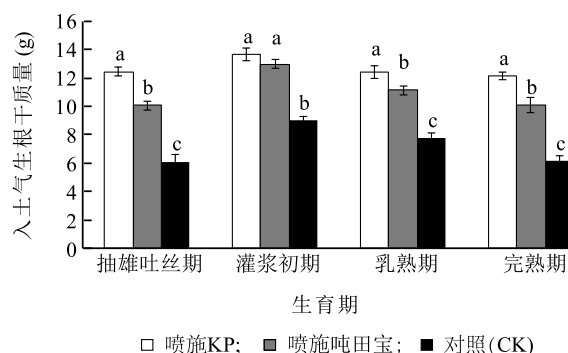
图6 植物生长调节剂对玉米入土气生根直径的影响

Fig.6 Effect of plant growth regulator on the diameter of aerial root in the soil of maize

2.10 植物生长调节剂对玉米入土气生根干质量的影响

从图7可以看出,入土气生根干质量随玉米的生长发育先升高后降低,灌浆初期出现最大值,随后减小。在各个生育期,与对照相比,植物生长调节剂处理后,植株的入土气生根干质量均显著增加。抽雄吐丝期、灌浆初期、乳熟期、完熟期,KP处理分别比对照增加103.43%、52.12%、60.52%和97.72%,吨田宝处理分别比对照增加64.54%、44.54%、43.87%和64.60%。KP处理玉米入土气生根干质量均大于吨田宝处理,在灌浆初期,两处理差异不显

著,其余各生育期差异均达到显著水平。说明KP处理更有利于入土气生根干质量的积累,使根系强壮发达,从而提高了玉米植株的抗倒伏能力。



不同小写字母表示同一时期不同处理间差异达 0.05 水平显著。

图7 植物生长调节剂对玉米入土气生根干质量的影响

Fig.7 Effect of plant growth regulator on dry weight of aerial root in the soil of maize

2.11 玉米茎秆及根系相关性状与倒伏率的相关性分析

表4表明,除了茎粗与倒伏率显著相关外,其他指标都与倒伏率极显著相关。其中株高、穗位高、重心高度、节间长度与倒伏率呈极显著正相关,穿刺强度、弯折强度与倒伏率呈极显著负相关。说明提高茎秆穿刺强度和弯折强度,降低玉米株高、穗位高、重心高度和节间长度,有利于降低玉米倒伏率。

表5表明,入土气生根相关性状都与倒伏率呈极显著负相关,其中入土气生根直径与倒伏率相关性最大。说明提高入土气生根条数、入土深度、直径和干质量有利于降低倒伏率,提高玉米根系抗倒伏能力。

3 讨论

3.1 植物生长调节剂通过改善玉米茎秆性状增强抗倒伏能力

玉米茎秆的形态特征影响其抗倒伏能力^[28],株高、重心高度和基部节间长度等都会影响玉米的抗倒伏指数,茎秆的弯折强度和穿刺强度也会影响玉米的抗倒伏能力^[29]。杨艳华等^[30]在水稻上研究发现,倒伏指数与基部节间长度呈显著正相关,与基部节间的粗度、壁厚和截面积呈显著负相关。通过喷施植物生长调节剂优化茎秆抗倒伏性状,提高玉米茎秆抗倒伏能力,是一种非常有效的方法。李宁

表 4 灌浆初期玉米茎秆相关性状与倒伏率的相关性分析

Table 4 Correlation analysis between maize stem traits and lodging rate at early filling stage

| 性状 | 株高 | 穗位高 | 茎粗 | 重心高度 | 节间长度 | 穿刺强度 | 弯折强度 | 倒伏率 |
|------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|------|
| 株高 | 1.00 | | | | | | | |
| 穗位高 | 0.83 ** | 1.00 | | | | | | |
| 茎粗 | -0.75 * | -0.54 | 1.00 | | | | | |
| 重心高度 | 0.93 ** | 0.87 ** | -0.59 | 1.00 | | | | |
| 节间长度 | 0.94 ** | 0.91 ** | -0.78 ** | 0.90 ** | 1.00 | | | |
| 穿刺强度 | -0.85 ** | -0.89 ** | 0.45 | -0.93 ** | -0.80 ** | 1.00 | | |
| 弯折强度 | -0.91 ** | -0.87 ** | 0.58 | -0.99 ** | -0.87 ** | 0.94 ** | 1.00 | |
| 倒伏率 | 0.92 ** | 0.88 ** | -0.66 * | 0.97 ** | 0.94 ** | -0.90 ** | -0.94 ** | 1.00 |

* 和 ** 分别表示相关性达 0.05 和 0.01 显著水平。

表 5 灌浆初期玉米根系相关性状与倒伏率的相关性分析

Table 5 Correlation analysis between maize root traits and lodging rate at early filling stage

| 性 状 | 入土气生根条数 | 入土气生根入土深度 | 入土气生根直径 | 入土气生根干质量 | 倒伏率 |
|-----------|----------|-----------|----------|----------|------|
| 入土气生根条数 | 1.00 | | | | |
| 入土气生根入土深度 | 0.92 ** | 1.00 | | | |
| 入土气生根直径 | 0.96 ** | 0.96 ** | 1.00 | | |
| 入土气生根干质量 | 0.91 ** | 0.89 ** | 0.92 ** | 1.00 | |
| 倒伏率 | -0.96 ** | -0.95 ** | -0.98 ** | -0.96 ** | 1.00 |

** 表示相关性达 0.01 显著水平。

等^[31]的研究结果表明,植物生长调节剂能降低植株高度、穗位高系数、节间长度,节间直径和茎粗系数显著提高。张倩等^[32]研究发现,30%己·乙水剂能显著降低株高和穗位高,增加节间直径、木质素含量和抗折力,缩短第 3 节间长度,提高了植株的抗倒伏能力。李振丽等^[33]对小麦起身期和拔节期喷施多效唑处理后,株高、节间长度及重心高度均显著降低,基部节间直径也有所增加,抗倒伏能力显著提高。本试验结果表明,KP 和吨田宝处理都不同程度地降低了株高、穗位高、穗高系数、重心高度以及基部节间长度,而增加了茎粗和茎粗系数,这些玉米形态性状的改变都提高了玉米茎秆的抗倒伏能力。玉米茎秆质量性状表现在茎秆弯折强度和穿刺强度上,勾玲等^[34]用不同抗倒性品种探讨弯曲性能与抗倒能力关系时发现,弯折强度与田间倒伏率呈极显著负相关。而张月玲等^[35]的研究结果表明,茎秆横折强度和田间抗拉弯强度与茎秆的抗倒伏能力关系密切。茎秆穿刺强度也与田间倒伏率具有非常高的相关性^[36],薛金涛等^[37]以中单 808 为试验材料,喷施化控剂处理,结果表明,增加了玉米茎秆节间的茎

粗,显著增强了茎秆的穿刺强度和抗弯折强度,显著降低了田间倒伏率。本试验结果与前人的研究结果相似,KP 和吨田宝处理都显著地增强了茎秆的穿刺强度和弯折强度,提高了玉米茎秆质量性状。相关性分析结果表明,株高、穗位高、重心高度、节间长度与倒伏率呈极显著正相关,茎粗与倒伏率呈显著负相关,穿刺强度、弯折强度与倒伏率呈极显著负相关,重心高度、节间长度和弯折强度与植株抗倒伏最密切。以灌浆初期为例,KP 处理的植株株高、穗位高、穗高系数、重心高度和第 3 节间长度分别比吨田宝处理显著降低,而茎粗、茎粗系数、弯折强度和穿刺强度显著提高。无论是在改善茎秆形态特征,还是在增强茎秆质量性状方面 KP 处理都优于吨田宝处理。

3.2 植物生长调节剂通过改善玉米气生根性状增强抗倒伏能力

根系倒伏也是造成玉米减产的主要原因^[38],气生根是玉米的地上节根,对玉米茎秆起着重要的支撑作用。玉米气生根条数、层数和根系干质量等性状都是判断根系抗倒伏的重要指标^[39]。喷施植物

生长调节剂能够增加气生根层数和条数,提高根系干质量和根系活力,进而提高春玉米的抗倒伏能力^[40-41]。董学会等^[42]的研究结果表明,30%己·乙水剂能够增加根系干质量,显著提高第8层气生根条数,兰宏亮等^[41]研究结果表明,经膦酸胆碱合剂处理后,气生根条数增加,根系干质量和根系活力提高。本试验结果与前人的研究结果相似,喷施植物生长调节剂的植株入土气生根条数、入土深度、直径以及气生根干质量均明显高于对照且达到显著水平。本试验相关分析结果表明,入土气生根条数、入土深度、直径以及气生根干质量均与倒伏率呈极显著负相关,其中入土气生根直径与植株抗倒伏关系最密切。喷施植物生长调节剂能显著提高玉米根系的抗倒伏能力,降低根系倒伏对农业生产的危害。其中在灌浆初期,与吨田宝处理相比,KP处理更能提高植株的根系质量,提高玉米的抗倒伏能力。

3.3 植物生长调节剂在玉米抗倒伏方面的应用前景

植物生长调节剂通过影响植物内源激素的合成、运输、代谢、与受体的结合以及此后的信号转导过程,而达到调控植物生长发育的目的。众多研究结果表明,植物生长调节剂能够调节玉米的群体空间结构,显著降低株高和穗位高,缩短基部节间的长度,重心下移,增加根系质量,提高根系活力,提高玉米的抗倒伏能力。

单一植物生长调节剂应用到玉米上,往往会引起一系列的生长效应,有些对玉米生长是有利的,但同时也会带来一些副作用。如果将2种或2种以上的调节剂混合使用,则可能相互取长补短,更完善地发挥它们的调节作用,起到相加或相乘的效应。例如,本试验的复配剂主要成分为ETH和DCPTA,其中ETH可以矮化玉米株高,增加茎粗,促进根系发育,但雌穗的发育也受到明显的抑制;而DCPTA是一种叔胺类低分子量、高生物活性的生物活性物质,目前已经得到广泛使用,能够提高玉米的光合能力,提高玉米的产量^[43]。因此,在开发一个新调节剂产品需要耗费巨额资金的前提下,研究植物生长调节剂相加增效效应及复配的规律变得十分重要。复配剂不仅能有效利用现有的植物生长调节剂资源,较快开发针对实际生产问题的产品,也可以形成独立或新的知识产权。

综上所述,植物生长调节剂可以有效地降低株

高、穗位高、重心高度,缩短基部节间长度,增加茎粗,优化玉米茎秆的形态性状。也可以增强茎秆的穿刺强度和弯折强度,提高玉米茎秆的质量性状。入土气生根的条数、入土深度、直径和干质量的增加可以提高玉米气生根的抓地和支撑能力,提高玉米茎秆及根系的抗倒伏能力。

参考文献:

- [1] DUVICK D N. The contribution of breeding to yield advances in maize (*Zea mays* L.) [J]. *Adv Agron*, 2005, 86: 83-145.
- [2] 韩晨光,王金龙,李子芳,等.种植密度对夏玉米叶片衰老及产量的影响[J].*江苏农业科学*,2015,43(7):62-64.
- [3] 钱春荣,于洋,宫秀杰,等.黑龙江省不同年代玉米杂交种产量对种植密度和施氮水平的响应[J].*作物学报*,2012,38(10):1864-1874.
- [4] 李洪梅,王西芝,蒋明洋,等.不同种植密度对夏玉米农艺性状及产量的影响[J].*山东农业科学*,2015,47(7):59-61.
- [5] 王晓琳.不同植物生长调节剂对玉米产量及农艺性状影响效果研究[D].北京:中国农业科学院,2012.
- [6] 宋朝玉,张继余,张清霞,等.玉米倒伏的类型、原因及预防、治理措施[J].*作物杂志*,2006(1):36-38.
- [7] 穆春华,孟昭东,张发军,等.玉米常用自交系茎节抗折强度分析[J].*玉米科学*,2009,17(2):34-37,43.
- [8] 丰光,景希强,李妍妍,等.玉米茎秆性状与倒伏性的相关和通径分析[J].*华北农学报*,2010,25(增刊):72-74.
- [9] PICKETT L K, LILJEDAHN J B, HAUGH G G, et al. Rheological properties of corn stalk subjected to transverse loading[J]. *Transactions of the American Society Agricultural Engineer*, 1969(12): 392-396.
- [10] ZUBER M S, COLBERT T R, DARRAH L L. Effect of recurrent selection for crushing strength on several stalk components in maize [J]. *Crop Science*, 1980, 20: 711-717.
- [11] 程帅,李鹏程,刘志刚,等.密度、氮肥对玉米杂交种节根数量的影响[J].*植物营养与肥料学报*,2016,22(4):1118-1125.
- [12] 沈学善,李金才,屈会娟,等.砂姜黑土区小麦玉米秸秆全量还田对玉米抗倒性能的影响[J].*中国农业科学*,2011,44(10): 2005-2012.
- [13] GUINGO E, HEBERT Y, CHARCOSSET A. Genetic analysis of root traits in maize[J]. *Agronomie*, 1998, 18(3): 225-235.
- [14] 王永学,张战辉,刘宗华.玉米抗倒伏性状的配合力效应及通径分析[J].*河南农业大学学报*,2011,45(1):1-6.
- [15] 黄海,陈德龙,常莹,等.玉米品种抗倒能力差异及其机制研究[J].*南京农业大学学报*,2014,37(4):22-30.
- [16] 田再民,黄智鸿,陈建新,等.种植密度对3个紧凑型玉米品种抗倒伏性和产量的影响[J].*玉米科学*,2016,24(5):83-88.
- [17] 李波,张吉旺,崔海岩,等.施钾量对高产夏玉米抗倒伏能力的影响[J].*作物学报*,2012,38(11):2093-2099.
- [18] 王亮,丰光,李妍妍,等.玉米倒伏与植株农艺性状和病虫

- 害发生关系的研究[J]. 作物杂志, 2016(2): 83-88.
- [19] 李玲, 赵明, 李连禄, 等. 乙矮合剂对玉米产量和茎秆质量的影响[J]. 作物杂志, 2007(5): 51-53.
- [20] 卢霖, 董志强, 董学瑞, 等. 乙矮合剂对不同密度夏玉米茎秆抗倒伏能力及产量的影响[J]. 作物杂志, 2015(2): 70-77.
- [21] 卫晓铁, 张明才, 李召虎, 等. 不同基因型玉米对乙烯利反应敏感性的差异[J]. 作物学报, 2011, 37(10): 1819-1827.
- [22] 卫晓铁, 张明才, 张燕, 等. 乙烯利对不同基因型玉米节间伸长和内源激素的影响[J]. 农药学报, 2011, 13(5): 475-479.
- [23] 王恒亮, 吴仁海, 朱昆, 等. 玉米倒伏成因与控制措施研究进展[J]. 河南农业科学, 2011, 40(10): 1-5.
- [24] 张倩, 张明才, 张海燕, 等. 30%矮·烯微乳剂对水稻茎秆理化特性的调控[J]. 作物学报, 2013, 39(6): 1089-1095.
- [25] 姚海坡, 董志强, 吕丽华, 等. 不同植物生长调节剂对冬小麦茎秆特性和产量的影响[J]. 华北农学报, 2015, 30(增刊): 152-156.
- [26] 郭庆法. 中国玉米栽培学[M]. 上海: 上海科技出版社, 2004: 69-73.
- [27] 陆卫平, 张其龙, 卢家栋, 等. 玉米群体根系活力与物质积累及产量的关系[J]. 作物学报, 1999, 25(6): 718-722.
- [28] 杜震宇, 童淑媛. 超密植条件下施用氮肥增效剂对玉米茎秆特性和产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(5): 108-110.
- [29] 张经廷, 陈青云, 吕丽华, 等. 夏玉米产量及茎秆抗倒伏性状对不同肥料滴灌配施的响应[J]. 华北农学报, 2015, 30(6): 209-215.
- [30] 杨艳华, 朱镇, 张亚东, 等. 不同水稻品种(系)抗倒伏能力与茎秆形态性状的关系[J]. 江苏农业学报, 2011, 27(2): 231-235.
- [31] 李宁, 李建民, 翟志席, 等. 化控技术对玉米植株抗倒伏性状、农艺性状及产量的影响[J]. 玉米科学, 2010, 18(6): 38-42.
- [32] 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.
- [33] 李振丽, 程瑞婷, 李瑞奇, 等. 行距配置和化控对冬小麦茎秆质量和抗倒性能的影响[J]. 麦类作物学报, 2013, 33(3): 507-513.
- [34] 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.
- [35] 张月玲, 王宜伦, 谭金芳, 等. 氮硅配施对夏玉米抗倒性和产量的影响[J]. 玉米科学, 2012, 20(4): 122-125.
- [36] SHERI A M, DARRAH L L, HIBBARD B E. Divergent selection for rind penetrometer resistance and its effects on european corn borer damage and stalk traits in corn[J]. Crop Science, 2004, 44(3): 711-717.
- [37] 薛金涛, 张保明, 董志强, 等. 化学调控对玉米抗倒性及产量的影响[J]. 玉米科学, 2009, 17(2): 91-94, 98.
- [38] 李树岩, 王宇翔, 胡程达, 等. 抽雄期前后大风倒伏对夏玉米生长及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(8): 2405-2413.
- [39] 刘武仁, 郑金玉, 罗洋, 等. 培土厚度对玉米根系特性的影响[J]. 吉林农业科学, 2011, 36(4): 1-3.
- [40] 许暉, 李小艳, 张占芳, 等. 乙烯利-甜菜碱复配剂对玉米生长发育的影响[J]. 玉米科学, 2014, 22(5): 71-75.
- [41] 兰宏亮, 董志强, 裴志超, 等. 磷酸胆碱合剂对东北地区春玉米根系质量与产量的影响[J]. 玉米科学, 2011, 19(6): 62-69.
- [42] 董学会, 段留生, 何钟佩, 等. 30%己乙水剂对玉米根系生理活性的调控效应[J]. 作物学报, 2005, 31(11): 1500-1505.
- [43] 顾万荣, 李召虎, 翟志席, 等. 酰胺类活物质对玉米叶片光合特性与叶绿素荧光特性的调控效应[J]. 华北农学报, 2008, 23(3): 85-89.

(责任编辑: 陈海霞)