

植物生长调节剂复配腐植酸对玉米茎秆强度、籽粒灌浆及产量的影响

颜培启¹ 孔令捷¹ 池昇隆¹ 于洋¹ 孔德庸¹ 孙海燕^{1,2}

(¹黑龙江八一农垦大学农学院, 163319, 黑龙江大庆; ²黑龙江省现代农业栽培技术与作物种质改良重点实验室, 163319, 黑龙江大庆)

摘要 合理提高单株粒重与种植密度有助于提高玉米产量, 但密度过高易引发倒伏及抑制果穗发育等问题。以玉米品种先玉 335 为试验材料, 在高密度 (82 500 株/hm²) 种植条件下, 于拔节期喷施乙烯利 (ETH, 500 mg/L) + 胺鲜酯 (DA-6, 25 mg/L) (ED) 或芸苔素内酯 (BR, 100 mg/L) (EB), 与 0 (1)、200 (2)、400 (3)、600 (4) 和 800 mg/L (5) 浓度的腐植酸 (HA) 复配, 共 11 个处理 (商用调节剂玉黄金为对照), 研究其对茎秆强度、籽粒灌浆及产量的调控效应。结果表明, 在生育期内, ED3 和 ED5 处理显著提高了茎粗, 较 CK 处理平均提高 2.93%~3.74%; 与 CK 处理相比, EB3 和 ED3 处理的穿刺强度分别显著提高 9.80% 和 14.46%, 压折强度分别显著提高 9.32% 和 14.09%; ED3 和 EB4 处理的百粒重较 CK 处理分别提高 3.95% 和 2.33%。百粒重与灌浆参数 V_{\max} 、 W_{\max} 和 V_a 呈极显著正相关, 与 W_2 和 V_2 呈显著正相关, ED3 处理对籽粒灌浆参数的促进效果最优。ED3 与 EB4 较 CK 处理分别增产 4.69% 和 5.40%。综上所述, ED3 和 EB4 处理可显著增强玉米茎秆强度, 提升抗倒伏能力, 同时优化籽粒灌浆进程, 进而显著提高产量, 适用于本研究的高密度种植模式。

关键词 玉米; 植物生长调节剂; 腐植酸; 茎秆强度; 籽粒灌浆; 产量

玉米是我国重要的粮食作物, 东北地区作为我国主要玉米产区, 在保障粮食安全方面具有举足轻重的地位, 提高该产区玉米产量对保障我国粮食安全意义重大。当前, 提高玉米产量主要有 2 种途径, 一是提升种植密度, 二是增加单株玉米粒重。在合理范围内提高种植密度, 能够有效促进产量增长。然而, 一旦密度超过适宜范围, 负面效应便会接踵而至。随着种植密度不断增高致使玉米株高徒长, 茎秆却变得细弱, 这大大增加了倒伏的风险^[1]。此外, 高密度种植致使田间植株间距过小, 水汽流通严重受阻, 为病虫害的滋生与传播创造了温床^[2], 最终导致产量降低^[3]。茎秆是水分、矿质养分和光合产物的运输通道, 较粗的茎秆通常含有更多的维管束, 能够增加籽粒灌浆效率并提高产量^[4]。机械强度高的茎秆可降低倒伏风险^[5-7], 减少玉米螟等蛀茎害虫的侵入, 降低茎腐病发生率^[8-9]。籽粒灌浆阶段光合产物的积累直接决定粒重, 进而影响产量。小麦籽粒中约 70% 的干物质为淀粉, 其合成速率受灌浆期温度调控。高温会抑制淀粉合成酶活性, 导致粒重下降^[10]。玉米灌浆期若遭遇倒伏, 最大粒重可下降 8.80%~22.30%, 尤其是灌浆中后期倒伏对产量影响更显著^[11], 玉米种植密度过高也会抑制灌

浆速率, 降低粒重^[12]。

植物生长调节剂是一种人工合成的物质, 不仅可以提高作物产量^[13]、改善品质^[14], 也能增强作物抗逆性^[15]等。文廷刚等^[16]研究表明, 乙烯利 (ETH) 复配处理显著提高小麦籽粒灌浆速率和缩短灌浆期, 还可通过影响碳氮代谢和激素平衡优化灌浆过程, 并可缩短茎秆节间长度, 增加茎秆纤维素和木质素含量, 从而提高抗折力^[17]。Xu 等^[18]研究发现, 喷施 ETH 与矮壮素合剂还可改善高密种植条件下的冠层光分布, 提高花粉密度, 从而提高产量。在高密度条件下, 胺鲜酯 (DA-6) 可增加叶面积进而促进光合作用、提高保护酶活性, 降低丙二醛 (MDA) 含量并提高产量, 缓解胁迫对玉米幼苗造成的不利影响^[19-20], DA-6 与 ETH 复配使用可通过缩短节间长度、增加茎节粗度及机械强度, 提高抗倒伏能力, 通过增加行粒数和穗粒重促进产量的提升^[21-22]。芸苔素内酯 (BR) 可以通过调节基因的表达调节叶角的大小进而影响光能利用, 也是影响玉米产量的重要因素^[23], 并且可通过增加库容量与源的供应能力促进产量的提升^[24]。苏超宇^[25]研究表明 ETH 与 BR 复配较单独使用更有利于抗倒伏能力及产量的提升。

作者简介: 颜培启, 主要从事植物营养与肥料研究, E-mail: 1946142877@qq.com

孙海燕为通信作者, 主要从事植物营养与生理研究, E-mail: shysun7908@126.com

基金项目: 黑龙江省“双一流”学科协同创新成果建设项目“粮食作物绿色低碳” (LJGXCG2022-107)

收稿日期: 2025-05-26; 修回日期: 2025-06-09; 网络出版日期: 2026-02-11

腐植酸 (HA) 是腐植质中的一种, 广泛分布于土壤和煤炭当中, HA 主要由含-OH 基团的可溶部分以及由脂肪链和芳香环组成的不可溶部分构成^[26-27]。HA 可通过增强根系吸收能力提高叶片叶绿素含量、加快灌浆期干物质积累, 通过诱导抗氧化酶活性减少逆境胁迫对茎秆的损伤, 同时促进木质素沉积、提升机械强度^[28]并促进作物生长, 使作物根系生物量增加, 提高养分吸收效率^[29], 提高叶绿素含量、促进碳同化, 缓解氧化胁迫, 提高非生物胁迫的耐受性^[30]。前人研究多集中于单独喷施生长调节剂或 HA, 但生长调节剂复配 HA 的研究则鲜有报道。本试验将植物生长调节剂与不同浓度 HA 混合后叶面喷施, 通过研究其对茎秆强度、籽粒灌浆过程以及产量等因素的影响, 为实现玉米高产密植抗倒伏提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验于 2024 年在黑龙江省安达市黑龙江八一农垦大学安达试验基地 (46°24' N, 125°20' E) 进行。该地区属中纬度寒温带大陆性季风气候, 年均降水量 450~550 mm, 无霜期 130~140 d。供试土壤为石灰性灰钙土, 0~20 cm 耕层土壤理化性质为有机质 18.77 g/kg、碱解氮 92.18 mg/kg、有效磷 17.73 mg/kg 和速效钾 177.05 mg/kg。

1.2 试验设计

于 2024 年 5 月 1 日播种, 供试玉米品种为先玉 335, 种植密度 82 500 株/hm², 行距 65 cm, 株距 19 cm, 采用随机区组设计, 每小区长 11.00 m, 宽 5.85 m。采用人工背负式喷雾器于玉米拔节期 (V7) 叶面喷施 ETH (500 mg/L)+DA-6 (25 mg/L) 或 BR (10 mg/L) (调节剂喷施浓度经预试验筛选得出), 与腐植酸 (HA, 0、200、400、600 和 800 mg/L) 复配, 对照 (CK) 为商用调节剂玉黄金 (主要成分为 27% ETH 与 3% DA-6 混合水剂, 四川国光农化股份有限公司), 共 11 个处理 (表 1), 喷液量 450 L/hm², 喷头距冠层 50 cm。分别于吐丝期 (R1)、乳熟期 (R3) 和完熟期 (R6) 进行植株取样, 于 R1 期 7 d 后进行果穗取样, 每隔 7 d 取样 1 次, 直至玉米成熟。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 茎粗、压折强度及穿刺强度 分别于 R1、R3 和 R6 期选择长势均匀一致的植株, 采用游标卡

表 1 不同处理的调节剂复配 HA 浓度
Table 1 The concentration of HA combined with regulators in different treatments

处理 Treatment	调节剂 Regulator	HA 浓度 HA concentration (mg/L)
CK	玉黄金	0
ED1	ETH+DA-6	0
ED2	ETH+DA-6	200
ED3	ETH+DA-6	400
ED4	ETH+DA-6	600
ED5	ETH+DA-6	800
EB1	ETH+BR	0
EB2	ETH+BR	200
EB3	ETH+BR	400
EB4	ETH+BR	600
EB5	ETH+BR	800

尺测量茎粗, 采用 YYD-1 型茎秆强度测定仪 (浙江托普云农科技股份有限公司) 分别测定第 3 节穿刺强度及第 5 节压折强度, 每个处理 6 次重复。

1.3.2 籽粒干重及灌浆参数 选取长势一致的玉米果穗 6 穗, 取上、中和下部籽粒共 100 粒, 80 °C 烘干至恒重, 参照朱庆森等^[31]的方法, 采用 Richards 方程模拟籽粒灌浆过程: $W=A/(1+Be^{-Kt})^{(1/D)}$, 式中, A 为终极生长量, B 为初始生长量参数, K 为生长速率参数, D 为形状参数, t 为吐丝后天数 (吐丝当天为 0), W_{max} 为灌浆速率最大时的生长量, W_2 为快增期生长量, W_3 为缓增期生长量, 对方程进行一阶、二阶求导可确定灌浆速率最大时的日期 (T_{max})、平均灌浆速率 (V_a)、最大灌浆速率 (V_{max})、快增期灌浆速率 (V_2)、缓增期灌浆速率 (V_3)、活跃生长期 (D_0)、渐增期持续时间 (t_1)、快增期持续时间 (t_2)、缓增期持续时间 (t_3) 和起始生长势 (R_0)。

1.3.3 产量及其构成因素 于 R6 期连续选取 30 穗玉米进行考种, 同时测定穗粒数、籽粒重和含水率等指标, 每个处理 3 次重复。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2021 进行数据整理, 采用 Origin 2021 绘图, 利用 SPSS 21.0 软件进行统计分析 with 差异显著性分析。

2 结果与分析

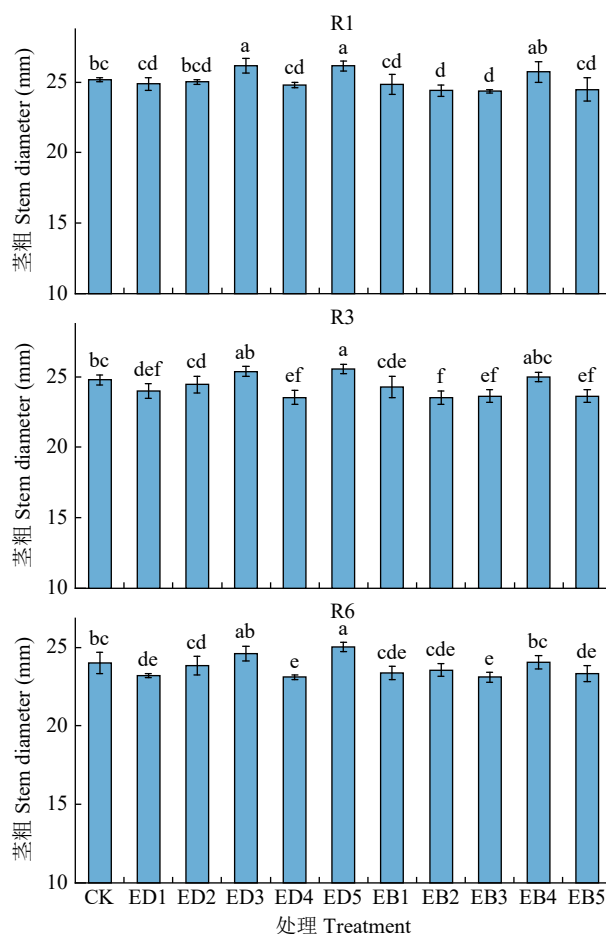
2.1 植物生长调节剂复配 HA 对玉米茎秆强度的影响

2.1.1 对茎粗的影响 如图 1 所示, 在 R1 期, ED3 与 ED5 处理的玉米茎粗较 CK 处理分别显著提高

3.84%和 3.82%，二者间无显著差异，而 ED 组合其他处理与 CK 处理均无显著差异；EB2 和 EB3 处理的茎粗较 CK 处理分别显著降低 3.15%和 3.34%，EB1 和 EB5 处理的茎粗较 CK 处理分别降低 1.43%和 2.82%，EB4 处理较 CK 处理提高 2.11%，但是三者与 CK 间均无显著差异。在 R3 期，ED1 与 ED4 处理的茎粗较 CK 处理分别显著降低 3.24%和 5.03%，ED3 较 CK 处理提高 2.43%，但二者间无显著差异，ED5 处理的茎粗较 CK 处理显著提高了 3.16%；EB2、EB3 和 EB5 处理的茎粗较 CK 处理显著降低 4.60%~5.11%，EB4 较 CK 处理提高了 0.89%，但二者间无显著差异。在 R6 期，ED1 和 ED4 处理的茎粗较 CK 处理显著降低 3.31%~3.79%，而 ED5 较 CK 处理显著提高 4.25%，其他 ED 处理与 CK 间无显著差异；EB3 和 EB5 处理的茎粗较 CK 处理显著降低 2.84%~3.78%，而其他 EB 处理与 CK 间无显著差异。

由表 2 可知，HAC、PGR 及 HAC×PGR 对茎粗均有极显著影响，同时通过偏 η^2 （反应自变量对因变量的影响强度，一般>15%为强效应）可知，对茎粗影响最强的变量为 HAC×PGR，其次为 PGR，影响最小的为 HAC。

2.1.2 对穿刺强度及压折强度的影响 由图 2 可知，在 R1 期，ED2、ED3 和 ED5 处理的穿刺强度较 CK 处理显著提高 5.08%~16.17%，而其他 ED 组合处理的穿刺强度与 CK 处理无显著差异，EB3



不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著。下同。
Different lowercase letters indicate significant differences at the $P < 0.05$ level. The same below.

图 1 植物生长调节剂复配 HA 对玉米茎粗的影响
Fig.1 Effects of plant growth regulators combined with HA on the stem diameter of maize

表 2 植物生长调节剂复配 HA 对玉米茎粗影响的主体效应检验

Table 2 Main effect tests of plant growth regulators combined with HA on the stem diameter of maize

自变量 Independent variable	因变量 Dependent variable	平方和 SS	自由度 df	均方 MS	F	P	偏 η^2 η_p^2 (%)
HAC	茎粗 Stem diameter	6.546	4.000	1.637	7.521	0.001	25.1
PGR		9.565	1.000	9.565	43.957	0.001	32.8
HAC×PGR		36.179	4.000	9.045	41.564	0.001	64.9
误差 Error		19.585	90.000	0.218			
总计 Total		71 323.379	120.000				

HAC、PGR、HAC×PGR 分别代表 HA 浓度、植物生长调节剂、HA 浓度与植物生长调节剂互作。下同。
HAC, PGR, and HAC×PGR represent HA concentration, plant growth regulator, and the interaction between HA concentration and plant growth regulator, respectively. The same below.

和 EB4 处理的穿刺强度较 CK 分别显著提高 8.97%和 8.08%，而其他 EB 组合处理与 CK 间无显著差异；ED3、ED5 和 EB3 处理的压折强度较 CK 处理分别显著提高了 11.95%、9.89%和 9.20%，ED1 和 EB1 处理较 CK 处理分别显著降低 4.75%和 5.24%。而其余处理与 CK 处理无显著差异。在 R3 期，

ED2~ED5 处理的穿刺强度较 CK 处理显著提高 7.25%~17.01%，EB3 和 EB4 处理的穿刺强度较 CK 处理显著提高 9.16%和 10.42%，其他处理的穿刺强度与 CK 处理均无显著差异；ED3 和 ED5 处理的压折强度较 CK 处理分别提高 17.30%和 11.09%，EB2~EB5 处理的压折强度较 CK 处理显著提高

4.02%~10.84%，其他处理与CK无显著差异。在R6期，ED3和ED5处理的穿刺强度较CK处理分别提高10.20%和9.12%，EB3和EB4处理的穿刺强度较CK处理分别显著提高6.63%和10.03%，

其他处理与CK处理间无显著差异；ED3、ED5和EB3处理的压折强度较CK处理分别显著提高13.01%、11.12%和7.92%，EB1处理的压折强度较CK处理显著降低5.76%，而其他处理与CK间均

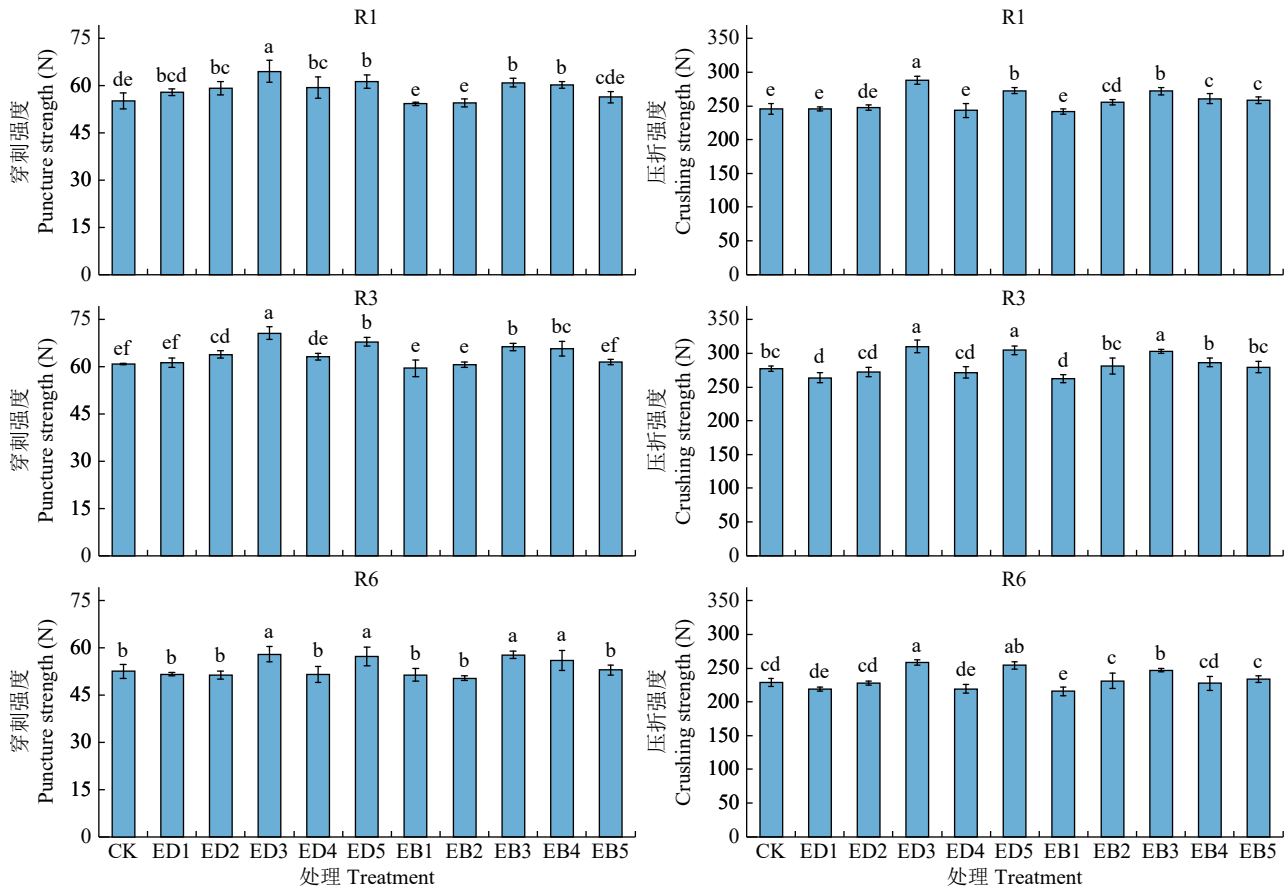


图2 植物生长调节剂复配HA对玉米茎秆强度的影响

Fig.2 Effects of plant growth regulators combined with HA on stalk strength of maize

无显著差异。

通过表3可知，HAC、PGR、HAC×PGR对压折强度均有极显著影响，PGR对穿刺强度有显著影

响，HAC和HAC×PGR的影响为极显著，此时通过观察偏 η^2 可知HAC对于压折强度及穿刺强度影响最大，其次为HAC×PGR，影响最小的为PGR。

表3 植物生长调节剂复配HA对玉米茎秆强度影响的主体效应检验

Table 3 Main effect test of plant growth regulators combined with HA on stalk strength of maize

自变量 Independent variable	因变量 Dependent variable	平方和 SS	自由度 df	均方 MS	F	P	偏 η^2 η_p^2 (%)
HAC	压折强度	744.916	4	186.229	50.943	0.001	69.4
PGR	压折强度	125.495	1	125.495	34.329	0.001	27.6
HAC×PGR	压折强度	196.968	4	49.242	13.470	0.001	37.4
HAC	穿刺强度	21 682.123	4	5420.531	119.971	0.001	84.2
PGR	穿刺强度	241.117	1	241.117	5.337	0.023	5.6
HAC×PGR	穿刺强度	4340.569	4	1085.142	24.017	0.001	51.6
误差 Error	压折强度	329.007	90	3.656			
	穿刺强度	4066.398	90	45.182			
总计 Total	压折强度	420 660.845	120				
	穿刺强度	8 101 603.990	120				

2.2 植物生长调节剂复配 HA 对玉米籽粒灌浆及产量的影响

2.2.1 对百粒重的影响 如图 3 所示，随着 HA 配施浓度的增加，ED 和 EB 处理组合中均表现出两端浓度抑制效应。ED 组中 ED1 较 CK 处理显著下降 3.08%，ED2 和 ED4 处理的百粒重较 CK 处理分别下降 1.52% 和 1.46%；同处理组中 ED3 表现最优，百粒重较 CK 处理显著提高 3.95%。EB 组中的 EB3 处理的抑制效应较为显著，其百粒重低于同处

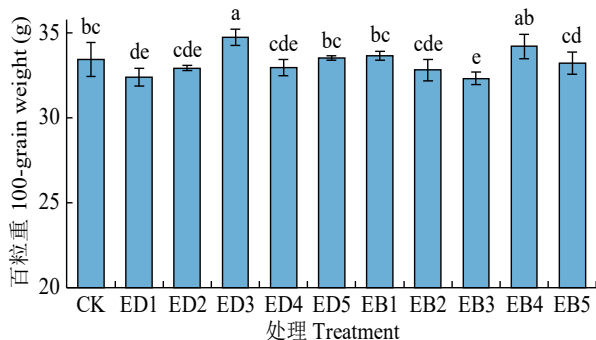


图 3 植物生长调节剂复配 HA 对玉米百粒重的影响
Fig.3 Effects of plant growth regulators combined with HA on 100-grain weight of maize

理组的 EB1 及对照组的 CK 处理，且 EB3 较 CK 处理显著降低 3.34%，EB4 处理表现最佳，较 CK 处理百粒重提升 2.33%。

2.2.2 对籽粒灌浆的影响 如表 4 模型拟合结果显示，所有处理组的决定系数 (R^2) 均高于 0.9 (范围 0.986~0.997)，且相关性分析表明 A 与百粒重的相关性达极显著 ($r=0.820, P<0.01$)，该参数可作为粒重形成的预测指标，证实 Richards 方程能够精准表征玉米籽粒灌浆动态。

如图 4 所示，ED 组与 CK 处理相比，较低及较高的 HA 浓度处理均提升了灌浆前中期的灌浆速率，表明在 ED 组中，HA 浓度对灌浆速率具有明显影响，低浓度与高浓度的 HA 均能在一定程度上促进灌浆前中期的干物质积累。在 EB 组处理中灌浆速率的峰值并未随着 HA 浓度的增加有较大的变化，这说明在 EB 处理中，植物生长调节剂对灌浆速率峰值的调控效应强度要强于 HA 浓度变化对灌浆速率峰值的影响。综上，ED 处理中 HA 浓度是影响灌浆速率的关键因素，而 EB 处理中调节剂则为主要影响因素，HA 浓度对灌浆速率峰值的影响

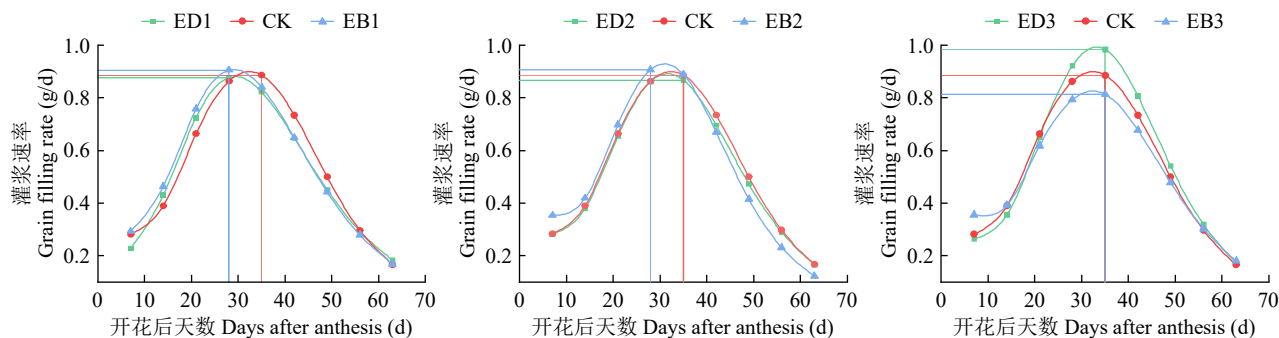
表 4 Richards 方程及玉米籽粒灌浆参数

Table 4 Richards equation and grain filling parameters of maize

处理 Treatment	Richards 方程 Richards equation	灌浆参数 Grain filling parameter				决定系数 R^2
		A	B	K	D	
CK	$y=34.908/(1+44.694e^{-0.096t})^{1/0.639}$	34.908bcd	44.694	0.096	0.639	0.997
ED1	$y=34.496/(1+1.562e^{-0.078t})^{1/0.206}$	34.496cd	1.562	0.078	0.206	0.992
ED2	$y=34.06/(1+7.554e^{-0.091t})^{1/0.547}$	34.06cd	7.554	0.091	0.547	0.996
ED3	$y=36.473/(1+13.665e^{-0.099t})^{1/0.663}$	36.473ab	13.665	0.099	0.663	0.986
ED4	$y=34.199/(1+3.445e^{-0.085t})^{1/0.353}$	34.199cd	4.753	0.093	0.401	0.993
ED5	$y=35.763/(1+3.168e^{-0.083t})^{1/0.339}$	35.763abc	3.168	0.083	0.339	0.992
EB1	$y=35.247/(1+3.132e^{-0.082t})^{1/0.322}$	35.247abcd	3.132	0.082	0.322	0.994
EB2	$y=33.841/(1+20.511e^{-0.105t})^{1/0.771}$	33.841d	20.511	0.105	0.771	0.994
EB3	$y=34.133/(1+11.597e^{-0.089t})^{1/0.672}$	34.133cd	11.597	0.089	0.672	0.993
EB4	$y=36.889/(1+1.808e^{-0.075t})^{1/0.246}$	36.889a	1.808	0.075	0.246	0.988
EB5	$y=34.582/(1+21.987e^{-0.098t})^{1/0.596}$	34.582cd	21.987	0.098	0.596	0.996

不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著。下同。

Different lowercase letters indicate significant differences at the $P < 0.05$ level. The same below.



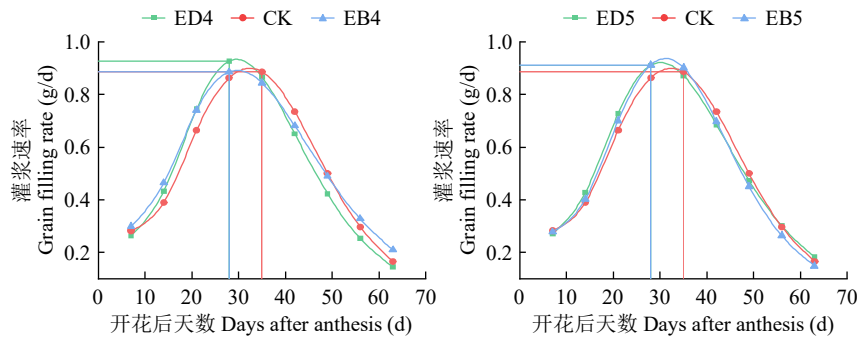


图4 玉米籽粒灌浆拟合方程及灌浆速率曲线

Fig.4 Fitting equations and filling rate curves of maize grain filling

相对较弱。

2.2.3 百粒重与灌浆参数相关性 如表5所示, V_{max} 、 W_{max} 和 V_a 与百粒重呈极显著正相关, W_2 、 V_2 与百粒重呈显著正相关, W_3 为影响百粒重的显著负相关参数, 相较于灌浆参数 W_2 和 V_2 , 提高 V_{max} 、 W_{max} 、 V_a 及降低 W_3 更有利于百粒重的增加。

表5 玉米百粒重与籽粒灌浆参数相关性分析
Table 5 Correlation analysis between 100-grain weight and grain filling parameters of maize

指标 Index	V_{max}	W_{max}	V_a	W_2	W_3	V_2
百粒重 100-grain weight	0.486**	0.397**	0.390**	0.321*	-0.320*	0.371*

“*”和“**”分别表示在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平显著相关。
“*” and “**” indicate significant correlation at $P < 0.05$ and $P < 0.01$ levels, respectively.

由表6可知, 对于灌浆参数 V_{max} , ED3较CK处理显著提高了7.24%, ED1和ED2分别较CK处理显著降低了4.69%和3.62%, EB1、EB3和EB4分别较CK处理显著降低了4.26%、10.76%和3.94%, 其余处理与CK间无显著性差异; 对于灌浆参数 W_{max} , ED3较CK处理显著提高了6.94%, ED1较CK处理显著降低了12.02%, 其余处理与

CK无显著性差异; 对于灌浆参数 V_a , ED3较CK处理显著提高了7.29%, EB3较CK处理显著降低了10.78%, 而其余处理与CK无显著性差异。

表6 植物生长调节剂复配HA对玉米灌浆参数的影响
Table 6 Effects of plant growth regulators combined with HA on grain filling parameters of maize

处理 Treatment	T_{max} (d)	V_{max} (g/d)	W_{max} (g)	V_a (g/d)	D_0 (d)	R_0
CK	28.302ab	0.939bc	15.794ab	0.631ab	55.651bc	0.221c
ED1	25.814e	0.895d	13.895c	0.606bc	56.971b	0.411a
ED2	28.106b	0.905d	15.320b	0.61bc	55.871b	0.173de
ED3	29.531a	1.007a	16.890a	0.677a	53.852cd	0.155e
ED4	26.012de	0.947bc	14.711bc	0.640ab	53.474d	0.250c
ED5	26.677cde	0.933c	15.112bc	0.632ab	56.979b	0.250c
EB1	26.579cde	0.899d	15.572b	0.608bc	62.261a	0.380a
EB2	27.302bcd	0.948bc	16.004ab	0.636ab	53.404d	0.149e
EB3	28.570ab	0.838e	15.771ab	0.563c	60.784a	0.141e
EB4	26.157cde	0.902d	15.078bc	0.612bc	60.338a	0.330b
EB5	27.458bc	0.961b	15.558b	0.647ab	53.703cd	0.209cd

如表7所示, 对于灌浆参数 W_2 , EB1、EB3和EB4分别较CK处理显著提高13.27%、5.75%和6.24%, 其余处理与CK无显著性差异; 对于灌浆

表7 植物生长调节剂复配HA对玉米灌浆阶段的影响

Table 7 Effects of plant growth regulators combined with HA on grain filling stage of maize

处理 Treatment	渐增期 Gradual increase period			快增期 Rapid increase period			缓增期 Slow increase period		
	t_1 (d)	W_1 (g)	V_1 (g/d)	t_2 (d)	W_2 (g)	V_2 (g/d)	t_3 (d)	W_3 (g)	V_3 (g/d)
CK	15.399b	4.453bcd	0.2889b	26.305de	20.573cd	0.782cd	42.226c	8.842abc	0.209bc
ED1	12.268cd	3.888cd	0.316b	27.094cd	20.982bc	0.774d	45.864b	9.284ab	0.202bcd
ED2	14.970b	5.608a	0.375a	25.770e	20.240cd	0.786cd	37.661de	8.096de	0.215b
ED3	17.259a	4.997ab	0.2889b	24.543ef	21.321bc	0.869a	34.408f	7.513cd	0.219b
ED4	13.500c	4.580bc	0.338ab	25.022ef	19.773d	0.791cd	38.997d	9.511a	0.247a
ED5	13.272cd	4.432bcd	0.336ab	26.811cd	20.862bc	0.779d	42.881c	8.766bc	0.205bcd
EB1	11.898d	3.964cd	0.336ab	29.612a	23.304a	0.787cd	47.663a	7.157e	0.150e
EB2	15.257b	5.220ab	0.341ab	24.089f	19.644d	0.816bc	33.023f	8.656bc	0.262a
EB3	14.973b	4.890ab	0.327ab	27.695bc	21.755b	0.786cd	39.324d	7.349e	0.187cd
EB4	11.854d	3.689d	0.315b	28.605ab	21.856b	0.764d	47.558ab	8.669bc	0.183d
EB5	15.126b	4.923ab	0.326ab	24.665ef	20.671cd	0.838ab	36.591e	8.112cd	0.222b

参数 V_2 ，ED3 和 EB5 分别较 CK 处理显著提高 11.13%和 7.16%，而其余处理与 CK 无显著性差异；对于灌浆参数 W_3 ，ED2、EB1 和 EB3 较 CK 处理分别显著降低 8.44%、19.06%和 16.89%，其余处理与 CK 无显著性差异。

2.2.4 对产量及其构成因素的影响 由表 8 可知，ED3 处理的百粒重较 CK 处理显著提高了 3.95%，ED1 和 EB3 处理分别较 CK 显著降低 3.08%和 3.34%，其余处理与 CK 无显著性差异；穗行数各处理与 CK 均无显著性差异；ED3 和 EB4 的行粒数分别较 CK 处理显著性提高 9.18%和 8.26%，其余处理与 CK 无显著性差异；ED3 产量最高，较 CK 处理显著提高 5.40%，其次为 EB4，较 CK 处理显著提高 4.69%，ED4 和 ED5 分别较 CK 处理显著提高 1.70%和 4.10%，EB1 和 EB5 分别较 CK 处理显著提高了 1.18%和 2.19%，ED1 和 ED2 分别较 CK 处理显著降低 2.24%和 3.24%，EB2 和 EB3 处理产量虽有降低，但与 CK 处理间无显著性差异。

表 8 植物生长调节剂复配 HA 对玉米产量及其构成因素的影响
Table 8 Effects of plant growth regulators combined with HA on yield and its components of maize

处理 Treatment	百粒重 100-grain weight (g)	穗行数 Kernel rows per ear	行粒数 Kernels per row	产量 Yield (kg/hm ²)
CK	33.44bc	16.67a	36.33bc	14 581.44d
ED1	32.41de	16.00a	35.33c	14 082.40f
ED2	32.93cde	16.00a	35.67bc	14 255.38e
ED3	34.76a	16.67a	39.67a	15 368.21a
ED4	32.95cde	16.67a	38.33bc	14 829.57c
ED5	33.53bc	16.67a	37.00b	15 179.93b
EB1	33.66bc	16.67a	36.33bc	14 900.96c
EB2	32.81cde	16.00a	35.67bc	14 453.32d
EB3	32.32e	16.67a	36.00bc	14 470.56d
EB4	34.21ab	16.67a	39.33a	15 265.47ab
EB5	33.23cd	16.67a	36.33bc	14 753.51c
HAC	*	ns	**	**
PGR	ns	ns	*	**
HAC×PGR	**	ns	*	**

“ns”表示无显著差异。

“ns” indicates no significant difference.

3 讨论

本研究表明喷施植物生长调节剂复配 HA 可以提高玉米茎粗、穿刺强度以及压折强度，并促进籽粒灌浆进程，进而提高产量。HA 和植物生长调节剂均可促进作物生长^[32-33]，提高抗性以促进产量^[34]及品质^[35]的提升，Khodadadi 等^[36]发现喷施

300 mg/L HA 和 100 mg/L 水杨酸可显著提高甜菜在干旱胁迫下的抗氧化能力，促进糖分积累。李跃伟等^[37]研究表明 ETH 处理能显著增加茎秆粗度，使玉米产量提高 15.31%，吴小丹等^[38]分别用 HA、微生物菌肥和 HA+微生物菌肥处理百合，混合处理组的茎粗是对照组的 1.57 倍，现蕾率是对照组的 2.57 倍，效果优于单施处理；ETH 与 DA-6 复配通过增加木质素和叶绿素含量提高苯丙氨酸解氨酶和过氧化氢酶活性，降低过氧化物酶活性^[39]，ETH 与 BR 复配通过增强木质素和纤维素等合成酶的活性及含量缩短节间长度，增加茎粗，显著增强密植玉米茎折强度且提升抗倒伏能力^[25]。进一步证实了两者协同对于茎粗及茎秆机械强度的提升作用，本试验结果与上述研究一致，且一定浓度范围内的 HA 可进一步提高玉米的抗倒伏能力。

喷施植物生长调节剂能减少倒伏风险，同时缩短节间长度以改善光合产物分配，提高籽粒灌浆效率，从而促进产量的提升^[40]。李英浩等^[41]研究指出，HA 可通过提高燕麦叶绿素含量、气孔导度和光合速率提升籽粒灌浆效率、缓解干旱胁迫，协同水分条件促进干物质积累以及增加千粒重来提升产量。赵海燕等^[42]对小麦的研究也证实，HA 喷施可增加可溶性糖和蛋白质含量、延缓叶片衰老，促进光合产物积累与运输，从而提升籽粒灌浆效率和千粒重，实现高产。Bhuvaneswari 等^[43]研究发现，HA 通过改善土壤环境促进养分吸收及叶绿素合成，微量元素参与光合作用和酶系统激活，植物生长调节剂促进细胞伸长、缩短开花时间并增强光合产物向籽粒的运输，这些因素共同提升干物质生产以影响产量及籽粒灌浆。同时，相关研究^[44]表明土壤施用 HA 结合叶面喷施生长调节剂可显著提高半干旱沙质土壤中小麦的产量，且中等浓度 HA 配施效果更优，与本试验中不同处理对百粒重及产量的影响趋势一致，且相较于单独使用植物生长调节剂或 HA，两者复配使用效果更好，说明植物生长调节剂与 HA 复配使用存在相互促进的协同作用。值得注意的是，EB 处理组中较低 HA 浓度的处理导致百粒重以及产量方面较同处理 EB1 有所降低，但随着 HA 浓度的增加这一现象又得到缓解，导致 EB 处理产生此种变化的原因可能是 HA 与 BR 或 ETH 两者之一或 3 种物质混合之后产生拮抗作用，而 ED 处理组并未表现出此现象。Cacco 等^[45]提出腐植质中可能含有具有拮抗激素活性的有毒物质，

试验中出现此现象的原因是否与之有关需要进一步研究。

刘艳丽等^[46]的研究也指出同类处理对不同作物效应存在差异,不同玉米品种对喷施处理的响应是否一致尚需验证。本研究试验数据为1年大田数据,后续研究可通过增加玉米品种和设置种植密度梯度,进一步明确植物生长调节剂与HA复配喷施在高密度种植条件下的应用效果,为玉米高产栽培提供更全面的理论依据。

4 结论

不同植物生长调节剂复配HA喷施玉米可以增加茎粗、茎秆强度及压折强度,提升玉米抗倒伏能力,促进籽粒灌浆阶段的干物质积累,并提高产量。本试验中ETH与DA-6复配400 mg/L HA(ED3)或ETH与BR复配600 mg/L HA(EB4)效果较好,可为高密度种植条件下的玉米种植提供理论依据。

参考文献

- [1] Shah A N, Tanveer M, Abbas A, et al. Combating dual challenges in maize under high planting density: stem lodging and kernel abortion. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 699085.
- [2] 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. *作物杂志*, 2016(2): 83-88.
- [3] 郭书磊, 陈娜娜, 齐建双, 等. 不同密度下玉米倒伏相关性状与产量的研究. *玉米科学*, 2018, 26(5): 71-77.
- [4] Ren H, Jiang Y, Zhao M, et al. Nitrogen supply regulates vascular bundle structure and matter transport characteristics of spring maize under high plant density. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 11: 602739.
- [5] Wu L M, Zhang W J, Ding Y F, et al. Shading contributes to the reduction of stem mechanical strength by decreasing cell wall synthesis in japonica rice (*Oryza sativa* L.). *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 881.
- [6] Zheng M J, Chen J, Shi Y H, et al. Manipulation of lignin metabolism by plant densities and its relationship with lodging resistance in wheat. *Scientific Reports*, 2017, 7: 41805.
- [7] Hussain S, Liu T, Iqbal N, et al. Effects of lignin, cellulose, hemicellulose, sucrose and monosaccharide carbohydrates on soybean physical stem strength and yield in intercropping. *Photochemical & Photobiol Sciences*, 2020, 19(4): 462-472.
- [8] Santiago R, Souto X C, Sotelo J, et al. Relationship between maize stem structural characteristics and resistance to pink stem borer (*Lepidoptera: Noctuidae*) attack. *Journal of Economic Entomology*, 2003, 96(5): 1563-1570.
- [9] Klenke J R, Russel W A, Guthrie W D. Distributions for European corn borer (*Lepidoptera: Pyralidae*) resistance ratings of S1 lines from 'BS9' corn. *Journal of Economic Entomology*, 1986, 79(4): 1076-1081.
- [10] 吴梦寅, 蔡炜, 钟笑涵, 等. 高温胁迫对水稻籽粒灌浆与稻米品质影响及其机理研究进展. *中国稻米*, 2024, 30(3): 10-17.
- [11] 李树岩, 杨光仙, 余卫东, 等. 夏玉米不同阶段及类型倒伏对籽粒灌浆及产量的影响. *中国生态农业学报*, 2025, 33(4): 723-736.
- [12] 李国芳, 杨清龙, 赵菁菁, 等. 密度对不同玉米品种产量及籽粒灌浆特性的影响. *农业科技通讯*, 2024(11): 82-86.
- [13] 房孟颖, 卢霖, 王庆燕, 等. 乙矮合剂对不同施氮量夏玉米根系形态构建和产量的影响. *中国农业科学*, 2022, 55(24): 4808-4822.
- [14] Ouzounidou G, Ilias I, Giannakoula A, et al. Comparative study on the effects of various plant growth regulators on growth, quality and physiology of *Capsicum annum* L.. *Pakistan Journal of Botany*, 2010, 42(2): 805-814.
- [15] Fahad S, Hussain S, Saud S, et al. Exogenously applied plant growth regulators affect heat-stressed rice pollens. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2016, 202(2): 139-150.
- [16] 文廷刚, 陈昱利, 杜小凤, 等. 不同植物生长调节剂对小麦籽粒灌浆特性及粒重的影响. *麦类作物学报*, 2014, 34(1): 84-90.
- [17] 朱占华. 植物生长调节剂对小麦茎秆抗倒伏能力及其产量和品质的影响. 南京: 南京农业大学, 2011.
- [18] Xu T, Wang D, Si Y, et al. Plant growth regulators enhance maize (*Zea mays* L.) yield under high density by optimizing canopy structure and delaying leaf senescence. *Agronomy*, 2024, 14(6): 1262.
- [19] Zhang J G, Li S J, Cai Q, et al. Exogenous diethyl aminoethyl hexanoate ameliorates low temperature stress by improving nitrogen metabolism in maize seedlings. *PLoS One*, 2020, 15(4): e0232294.
- [20] 聂乐兴, 姜兴印, 吴淑华, 等. 胺鲜酯对高产夏玉米产量及叶片光合羧化酶和保护酶活性的影响. *应用生态学报*, 2010, 21(10): 2558-2564.
- [21] 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. *玉米科学*, 2006, 14(1): 138-140, 143.
- [22] Zhang Q, Zhang L Z, Evers J, et al. Maize yield and quality in response to plant density and application of a novel plant growth regulator. *Field Crops Research*, 2014, 164: 82-89.
- [23] Ji X Z, Gao Q H, Zhuang Z L, et al. WGCNA analysis of the effect of exogenous BR on leaf angle of maize mutant *lpa1*. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 5238.
- [24] Gao Z, Liang X G, Zhang L, et al. Spraying exogenous 6-benzyladenine and brassinolide at tasseling increases maize yield by enhancing source and sink capacity. *Field Crops Research*, 2017, 211: 1-9.
- [25] 苏超宇. 乙烯利和芸苔素内酯对玉米茎秆抗倒伏性状和产量的影响. 沈阳: 沈阳农业大学, 2023.
- [26] de Melo B A G, Motta F L, Santana M H A. Humic acids: structural properties and multiple functionalities for novel technological developments. *Materials Science & Engineering: C*, 2016, 62: 967-974.
- [27] Klučáková M, Pekař M. Solubility and dissociation of lignitic humic acids in water suspension. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2005, 252(2/3): 157-163.
- [28] 孙婷, 陈养平, 杨晓军, 等. 腐植酸类生长调节剂对植物发芽和生长发育的影响. *腐植酸*, 2012(4): 19-25.
- [29] Calvo P, Nelson L, Kloepper J W. Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant and Soil*, 2014, 383(1): 3-41.
- [30] Canellas L P, Olivares F L, Aguiar N O, et al. Humic and fulvic acids as biostimulants in horticulture. *Scientia Horticulturae*, 2015, 196: 15-27.
- [31] 朱庆森, 曹显祖, 骆亦其. 水稻籽粒灌浆的生长分析. *作物学报*, 1988, 14(3): 182-193.
- [32] 陈瑞杰, 罗林毅, 阮向阳, 等. 腐植酸对滴灌棉田土壤养分和棉花产量及品质的影响. *新疆农业科学*, 2024, 61(9): 2112-

- 2121.
- [33] 申洁, 宋小静, 钟丹丹, 等. 腐植酸及 D-精氨酸对干旱胁迫下谷子幼苗根系生长的影响. 生态学杂志, 2025, 44(4): 1220-1225.
- [34] 赵黎明, 王亚新, 蒋文鑫, 等. 植物生长调节剂对优质粳稻产量、品质与光合特性的影响. 浙江农业学报, 2024, 36(5): 1003-1014.
- [35] 苏佳雯, 李海平, 李灵芝, 等. 腐植酸液体有机肥提升番茄产量与品质的研究. 山西农业大学学报, 2024, 44(6): 59-67.
- [36] Khodadadi S, Chegini M A, Soltani A, et al. Influence of foliar-applied humic acid and some key growth regulators on sugar beet (*Beta vulgaris* L.) under drought stress: antioxidant defense system, photosynthetic characteristics and sugar yield. *Sugar Tech*, 2020, 22(5): 765-772.
- [37] 李跃伟, 侯金丹, 孙慕芳, 等. 四种生长调节剂对玉米茎秆性状及抗倒伏性的影响. 江苏农业学报, 2023, 39(2): 377-382.
- [38] 吴小丹, 高丽, 巩天耕, 等. 微生物菌肥和腐植酸复合肥对百合生长和光合特性的影响. 中国农业科技导报, 2025, 27(4): 221-229.
- [39] 王明杰, 张佳琪, 武敏桦, 等. 30%胺鲜酯-乙烯利水剂(玉黄金)对密植春玉米茎秆折强度及生理特性的影响. 江苏农业科学, 2022, 50(20): 101-107.
- [40] 徐田军, 吕天放, 陈传永, 等. 种植密度和植物生长调节剂对玉米茎秆性状的影响及调控. 中国农业科学, 2019, 52(4): 629-638.
- [41] 李英浩, 王琦, 赵宝平, 等. 水分和腐植酸对燕麦籽粒产量和β-葡聚糖含量的协同提升效应. 作物学报, 2022, 48(10): 2663-2670.
- [42] 赵海燕, 甘淳丹, 兰汝佳, 等. 喷施新型腐殖酸型叶面肥对小麦旗叶抗氧化和产量及品质的影响. 南京农业大学学报, 2018, 41(4): 685-690.
- [43] Bhuvaneswari R, Karthikeyan P K, Srinivasan S, et al. Evaluation of humic acid, micronutrients mixture and plant growth regulators on growth and quality of bhendi. *Centre for Advanced Research in Agricultural Sciences*, 2023, 14: 139-142.
- [44] Abou Tahoun A M M, Abou El-Enin M M, Mancy A, et al. Integrative soil application of humic acid and foliar plant growth stimulants improves soil properties and wheat yield and quality in nutrient-poor sandy soil of a semiarid region. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2022, 22(3): 2857-2871.
- [45] Cacco G, Dell'Agnola G. Plant growth regulator activity of soluble humic complex. *Canadian Journal of Soil Science*, 1984, 64: 225-228.
- [46] 刘艳丽, 丁方军, 张娟, 等. 活化腐植酸-尿素施用对小麦-玉米轮作土壤氮肥利用率及其控制因素的影响. 中国生态农业学报, 2016, 24(10): 1310-1319.

Effects of Plant Growth Regulators Combined with Humic Acid on Stalk Strength, Grain Filling and Yield in Maize

Yan Peiqi¹, Kong Lingjie¹, Chi Shenglong¹, Yu Yang¹, Kong Deyong¹, Sun Haiyan^{1,2}

(¹College of Agriculture, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, Heilongjiang, China;

²Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Modern Agricultural Cultivation and Germplasm Improvement, Daqing 163319, Heilongjiang, China)

Abstract Reasonably increasing the grain weight per plant and the planting density helps improve maize yield, but excessive density tends to cause problems such as lodging and inhibition of ear development. Using maize variety Xianyu 335 as the experimental material, under high-density (82 500 plants/ha) planting conditions, ethephon (ETH, 500 mg/L) + diethyl aminoethyl hexanoate (DA-6, 25 mg/L) (ED) or brassinolide (BR, 100 mg/L) (EB) were sprayed at the jointing stage in combination with humic acid (HA) at concentrations of 0 (1), 200 (2), 400 (3), 600 (4), and 800 mg/L (5). A total of 11 treatments (with commercial regulator Yuhuangjin as the control, CK) were established to study their regulatory effects on stalk strength, grain filling, and yield. The results showed that during the growth period, ED3 and ED5 treatments significantly increased stem diameter, with an average increase of 2.93%-3.74% compared with CK. Compared with CK, the puncture strength of EB3 and ED3 treatments significantly increased by 9.80% and 14.46%, while the crushing strength significantly increased by 9.32% and 14.09%, respectively. The 100-grain weight of ED3 and EB4 treatments increased by 3.95% and 2.33% compared with CK, respectively. The 100-grain weight was extremely significantly positively correlated with grain filling parameters V_{max} , W_{max} , and V_a , and significantly positively correlated with W_2 and V_2 . ED3 treatment showed the best promotion effect on grain filling parameters. The yields of ED3 and EB4 treatments increased by 4.69% and 5.40% compared with CK, respectively. In conclusion, ED3 and EB4 treatments significantly enhanced stalk strength, improved lodging resistance, and optimized the grain filling process, thereby significantly increasing maize yield. These treatments are recommended for the high-density planting pattern used in this study.

Key words Maize; Plant growth regulators; Humic acid; Stalk strength; Grain filling; Yield