文章编号:1000-7601(2019)06-0043-06 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2019.06.07

植物生长调节剂对黄淮井灌区夏玉米水分利用效率的调控

张伟强[1,2],赵 犇[1],秦安振[1],宁东峰[1],孙 彬[3],丁鹏飞[3],
刘 见[1,3],臧海涛[3],刘战东[1],肖俊夫[1]

(1.中国农业科学院农田灌溉研究所/农业部作物需水与调控重点开放实验室,河南 新乡 453002;
2.河南省科学技术发展战略研究所,河南 郑州 450003;3.许昌市农田水利技术试验推广站,河南 许昌 461000)

摘 要:植物生长调节剂的研制和应用为实现玉米高产稳产、节水栽培提供了新的条件。试验于 2018 年在河南新乡研究了植物生长调节剂对京农科 728、新单 61、先玉 335 等品种水分利用效率的调控效应,试验采用裂区区组设计,品种为主区,副区为植物生长调节剂和清水对照。结果表明,不同基因型夏玉米品种产量水平、水分利用效率存在显著差异($P<0.05$)。植物生长调节剂能显著改善玉米水分利用效率、增加籽粒产量($P<0.05$),其中,水分利用效率最高增幅达 3.12 %,籽粒产量最高增幅达 3.09%。植物生长调节剂能显著降低倒伏率($P<0.05$),降幅最高达 90.00%,重塑了玉米株型建成。植物生长调节剂调控玉米水分利用效率的效应发生机制,可能在于改变了激素信号转导关键基因表达量,进而使其内源激素如 GA_3、ABA 含量发生了变化。

关键词:植物生长调节剂;夏玉米;水分利用效率;倒伏率;植物激素

中图分类号:S482.8 **文献标志码**:A

Regulation of water use efficiency of summer maize by plant growth regulator in well-irrigation area of Huang-Huai-Hai River

ZHANG Weiqiang[1,2], ZHAO Ben[1], QIN Anzhen[1], NING Dongfeng[1], SUN Bin[3],
DING Pengfei[3], LIU Jian[1,3], ZANG Haitao[3], LIU Zhandong[1], XIAO Junfu[1]

(1. *Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Lab for Crop Water Requirement and Regulation of Ministry of Agriculture, Xinxiang, Henan* 453002, *China*;
2. *Henan Institute of Science and Technology for Development, Zhengzhou, Henan* 450003, *China*;
3. *Xuchang Farmland Water Conservancy Technology Experimentation and Extension Station, Xuchang, Henan* 461000, *China*)

Abstract: The development and application of plant growth regulators provide potentials for high and stable yield and water saving in maize production. This experiment was conducted to study plant growth regulator effects in Xinxiang, Henan Province in 2018. Three hybrid maize cultivars (JNK728, XD61, and XY335) were selected as experimental crops for water use efficiency. In this study, the experiment design was a split randomized block design. The main block was cultivar and the sub-blocks were plant growth regulator treatment and the control with spraying pure water only. The results showed that maize yield and water use efficiency were affected significantly ($P<0.05$) by genotypes differences of summer maize. Plant growth regulators significantly improved water use efficiency and grain yield on all cultivars of maize ($P<0.05$). The highest increase in water use efficiency was 3.12%, and the highest increase in grain yield was 3.09%. Plant growth regulators significantly reduced lodging ($P<0.05$) and the highest decrease in lodging was 90.00%, which remodeled the plant type of maize. The mechanism of the effect in plant growth regulators on maize water use efficiency may be due to that they changed the expression of key genes

收稿日期:2018-12-20 **修回日期**:2019-10-21

基金项目:中央级科研院所基本科研业务费专项(FIRI2018-01);国家现代农业产业技术体系建设专项资金项目(CARS-02-05B)

作者简介:张伟强(1982-),男,河南许昌人,助理研究员,主要从事作物水分生理与高效用水研究。E-mail:zhangweiqiang@caas.cn

通信作者:刘战东(1981-),男,河南沁阳人,副研究员,从事水分生理与节水栽培新技术研究。E-mail:lzddragon@163.com

肖俊夫(1961-),男,辽宁庄河人,研究员,从事节水灌溉理论与栽培新技术研究。E-mail:xiaojunfu61@163.com

in hormone signal transduction, and then changed the contents of endogenous hormones such as GA_3 and ABA.

Keywords: plant growth regulator; summer maize; water use efficiency; lodging; plant hormone

黄淮海平原是我国主要粮食作物生产区域,具有较好的光热资源和灌溉设施,该区灌溉方式多为井灌,年际间气候变化大,季节性干旱、阴雨寡照、高温高湿等非生物逆境较重[1-3]。充足的水分是作物生长和发育的重要因素,也是作物获得高产的关键因子[4-5]。探讨玉米水分利用效率和耗水量的变化规律,对于因地制宜,挖掘玉米高产潜力,服务于新形势下国民经济发展具有重要意义[6-7]。

科学的栽培技术措施有助于改善玉米的生长发育状况,进而提高玉米水分利用效率。李迎等[8]试验发现,采用秸秆覆盖有助于夏玉米苗期棵间蒸发,减少全生育期耗水量,改善土壤结构,减少水土流失,提高其水分利用效率。周龄等[9]研究证实,起垄、不灌溉、低肥可以提高夏玉米的水分利用效率,从而达到节水节肥的目的。吴立峰等[10]在遮雨棚的试验发现,玉米苗期水分亏缺可以积累更多的活性氧,进而提高玉米水分利用效率。程铭慧等[11]报道认为,分根区交替灌溉下水分亏缺可显著改善夏玉米水分利用效率。

近年来,化学调节剂控制技术在玉米生产中的研究和应用取得较大成果,植物生长调节剂的研制和应用为实现我国玉米高产、稳产、高效栽培提供了有利条件[12-13]。植物生长调节剂外施于玉米幼苗期叶片,使叶片水分利用效率和抗旱性提高,其叶部形态结构、超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)等生理指标都发生变化[14]。植物生长调节剂在玉米上的应用研究多集中在抗旱性[5,15]、抗倒伏[16-17]、氮肥利用效率[18]等方面,有关玉米水分利用效率的研究特别是在灌区大田试验条件下的研究仍不很深入。

为创新黄淮井灌区玉米高产栽培技术,优化农田水分管理模式,本试验在河南新乡研究了植物生长调节剂对不同基因型夏玉米品种水分利用效率的调控,探讨了高密度条件下高产夏玉米水资源高效利用与调控技术特点,并从其内源激素含量、信号转导和水通道相关基因水平上明确相关线索,试图为黄淮海井灌区夏玉米绿色高产、节水栽培提供新的科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况与试验设计

本试验于2018年6—10月在中国农科院农田灌溉所七里营试验基地(35°19′N,113°53′E,海拔73.2 m)进行,该基地位于豫北新乡市人民胜利渠引黄灌区。试验区属典型的暖温带半湿润半干旱地区,土壤类型为潮土,质地为轻砂壤土。年平均降水量580 mm,年平均气温13.5℃,年均≥0℃积温为5 070℃,年日照时数2 497 h,无霜期220 d,年潜在蒸散量2 000 mm。

供试品种为京农科728、新单61、先玉335,种植密度为5 500株·hm^{-2},机播,每个品种试验地面积为0.1 hm^2。试验区前茬作物为冬小麦。试验采用裂区区组设计,品种为主区,副区为喷施植物生长调节剂吨田宝(拔节期喷施450 ml·hm^{-2},中国农科院作科所提供),其有效成分包含乙烯利、赤霉素和6-糠安吉嘌呤等,同体积清水作为对照(Control),区组内完全随机分布,4次重复。试验地土质为砂壤土,0~100 cm土层土壤容重为1.51 g·cm^{-3},田间持水率为25.6%,地下水埋深大于5 m。本试验施基肥选用磷酸二铵225 kg·hm^{-2},硫酸钾225 kg·hm^{-2},硫酸锌15 kg·hm^{-2};施肥深度不少于10 cm。拔节期、吐丝期追肥两次,每次尿素225 kg·hm^{-2}。试验其他管理同当地一般大田,保证作物正常生长发育,无病虫害影响。全生育期灌蒙头水25 mm、拔节水30 mm、灌浆水30 mm,用水表控制灌水量。中耕喷施玉米田专用除草剂进行土壤封闭。每项田间管理措施和测定都在同一天内完成,如遇特殊天气,同一重复必须在同一天内完成。

1.2 测定项目和方法

1.2.1 产量及其构成因素测定 玉米成熟期每小区取中间2行10 m长、面积为12 m^2样方的全部果穗,记录果穗数量作为收获穗数,称取所有鲜果穗重,按平均穗重法在每个副区中随机选择取10个标准果穗进行考种调查(穗粒数、千粒重、穗长、穗粗、秃尖长等),并进行人工脱粒,用M-8188NEW型谷物水分测定仪(KETT,日本)测定籽粒完熟时含水量,重复5次,平均数折算成14%含水量的千粒重和产量。出籽率(%) = 籽粒总重/果穗总重×100。

1.2.2 水分利用效率(WUE)的计算 公式如下:

$$WUE = Y/ET$$

式中,WUE为水分利用效率(kg·mm^{-1}·hm^{-2});Y为玉米籽粒产量(kg·hm^{-2});ET为生育期土壤耗水量(mm)。

土壤耗水量(ET)的计算公式如下:

$$ET=W_1-W_2+P$$

式中,W_1 为播前土壤贮水量(mm);W_2 为收获后土壤贮水量(mm);P 为生育期有效降水量(mm)。

土壤贮水量(W)的计算公式如下:

$$W=C\times\rho\times H\times 10$$

式中,C 为土壤水分质量分数(%);ρ 为土壤容重(g·cm^{-3});H 为土层深度(cm)。

土壤水分的测定:玉米播前和收获后分别测定 0~100 cm 土层土壤水分,取样位置在玉米田行间,0~20 cm 土层间隔 10 cm 取样,20 cm 以下土层间隔 20 cm 取样,采用烘干法测定土壤含水率,田间取样重复 3 次。

1.2.3　籽粒含水量的测定　玉米收获前完全成熟(乳线消失,籽粒基部出现黑色层)时,取人工授粉果穗采用直接烘干法测定籽粒含水量。取果穗中部籽粒百粒称取每部分鲜重,85℃烘干至恒重,取出称其干重,计算公式为:籽粒含水量(%)=(鲜重-干重)/鲜重×100,重复 5 次。

1.2.4　倒伏率的测定　玉米灌浆期(吐丝后 20 d)调查每小区倒伏植株的数量和总植株数,当植株茎秆与垂直方向的夹角大于 45°时记为倒伏植株,计算公式为:倒状率(%)= 倒状植株数/总植株数×100。

1.2.5　内源激素 GA_3 和 ABA 含量的测定　调节剂处理后 2 d,取不同基因型品种第 9 片叶,采用酶联免疫吸附检测法(ELISA)测定内源激素 GA_3 和 ABA 含量[19]。

1.2.6　激素信号转导相关基因 EIN2 和水分利用效率相关的水通道蛋白基因 TIP3-1 表达量的测定　调节剂处理后 2 d,取不同基因型品种第 9 片叶,提取总 RNA,逆转录合成 cDNA。根据玉米 β-tubulin 内参基因检测反转录产物。采用 SYBR green Ⅱ荧光染料法进行荧光定量 RT-PCR,测定结果采用 $2^{-\Delta\Delta}$Ct 法对基因相对表达量进行分析[20]。

引物分别为:

β-tubulin (5′-3′)F:GTACCGCGCTCTCACCGTGC,
R:ACGGAACATAGCAGATGCCG-TGA;

ZmEIN2 (5′-3′) F:ACTGCCGAGAATCAACTGCT,
R:CAAAGTTCTGGCCTGCTTTC;

ZmTIP3-1 (5′-3′) F:GCCATCTTCGTCTTCGCC,
R:CCACCCAGTACACCCATT。

1.3　数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2013 进行数据整理计算,用 SPSS 21 (Chicago, IL, USA) 软件进行数据统计分析,用 Duncan′s 新复极差法进行差异显著性检验,显著水平为 $P<0.05$。采用 Sigmaplot 12 绘图。

2　结果与分析

2.1　调节剂对不同基因型夏玉米品种产量的调控

不同基因型夏玉米品种之间产量差异显著($P<0.05$),清水对照条件下,新单 61 产量最高,为 9 527.90 kg·hm^{-2};京农科 728 产量最低,为 8 740.79 kg·hm^{-2},相差 9.01%。调节剂处理显著增加了不同基因型夏玉米品种产量,不同基因型夏玉米品种对调节剂的响应也存在不同,其中,先玉 335 由 9 098.62 kg·hm^{-2} 增加到 9 380.04 kg·hm^{-2},增幅达 3.09%;调节剂处理后的新单 61 增加到 9 635.06 kg·hm^{-2},增产1.12%(表 1)。

2.2　调节剂对不同基因型夏玉米品种水分利用效率的调控

不同基因型夏玉米品种之间水分利用效率差异显著($P<0.05$)(表 2),清水对照条件下,新单 61 水分利用效率最高,为 22.63 kg·mm^{-1}·hm^{-2};先玉 335 水分利用效率最低,为 20.52 kg·mm^{-1}·hm^{-2}。调节剂处理增加了不同基因型夏玉米品种水分利用效率,但增加幅度存在差异。与对照相比,调节剂处理下的先玉 335 增幅达3.12%,水分利用效率增加到 21.16 kg·mm^{-1}·hm^{-2},京农科 728、新单 61 水分利用效率也分别增加 2.61%和 1.09%。

表 1　调节剂对不同基因型夏玉米品种产量的影响

Table 1　Effects of plant growth regulator on grain yield of summer maize with different genotypes

品种 Cultivar	产量 Grain yield/(kg·hm^{-2})	
	对照 Control	处理 Treatment
京农科 728 JNK728	8740.79±432.23bc	8966.69±79.25b
新单 61 XD61	9527.90±23.30a	9635.06±40.58a
先玉 335 XY 335	9098.62±120.95b	9380.04±73.18a

注:不同小写字母代表品种间差异达 0.05 显著水平。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significance difference between cultivars at $P=0.05$ level. The same below.

表 2　调节剂对不同基因型夏玉米品种水分利用效率的调控

Table 2　Effects of plant growth regulator on water use efficiency of summer maize with different genotypes

品种 Cultivar	水分利用效率 Water use efficiency/(kg·mm^{-1}·hm^{-2})	
	对照 Control	处理 Treatment
京农科 728 JNK 728	21.18±0.49b	21.73±0.19b
新单 61 XD 61	22.63±0.05a	22.88±0.10a
先玉 335 XY 335	20.52±0.12b	21.16±0.16b

2.3 调节剂对不同基因型夏玉米品种产量构成因素的影响

不同基因型夏玉米品种之间千粒重存在显著差异($P<0.05$)(图 1)。清水对照条件下先玉 335 千粒重最高,为 375.18 g,京农科 728 最低,为 319.58 g;调节剂处理显著增加了不同基因型夏玉米品种千粒重,与对照相比,京农科 728、新单 61 千粒重增幅分别为 7.28%和 4.77%,高于先玉 335 增幅。就穗粒数而言,不同基因型夏玉米品种间也存在差异。清水对照条件下,京农科 728 最高,为 560 粒,先玉 335 最低,为 518 粒;调节剂处理显著增加了不同基因型夏玉米品种穗粒数,其中,先玉 335 增幅为 14.4%,高于京农科 728、新单 61,表明调节剂对千粒重、穗粒数的调控效应因基因型不同而存在差异。

2.4 调节剂对不同基因型夏玉米品种籽粒收获含水量的调控

不同基因型夏玉米品种之间籽粒收获含水量存在差异。由图 2 可知,京农科 728 籽粒收获含水量高于其它 2 个品种,为 22.90%,新单 61 最低,为 18.60%。调节剂处理显著降低了不同基因型夏玉米品种籽粒收获含水量,其中京农科 728 降幅高达 11.2%,其次为先玉 335,降幅为 4.21%,表明调节剂对籽粒收获含水量的作用因基因型不同而存在差异。

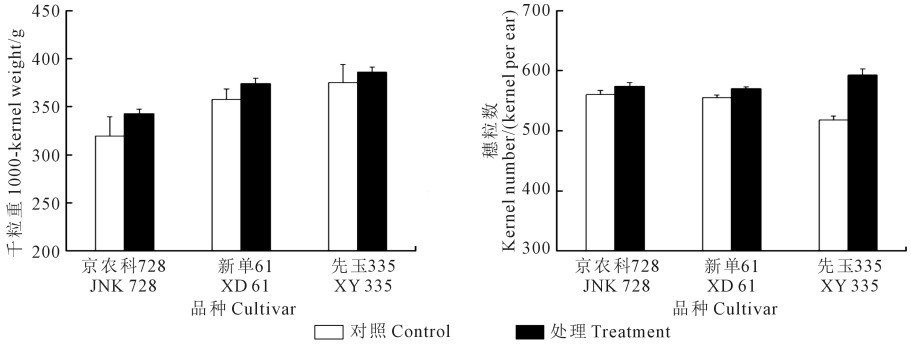
2.5 调节剂对不同基因型夏玉米品种收获出籽率的调控

不同基因型夏玉米品种之间收获出籽率存在差异,由图 3 可知,新单 61 收获出籽率较先玉 335、京农科 728 高,为 85.43%,先玉 335 最低,为 79.71%。调节剂处理显著增加了夏玉米收获出籽率,其中,先玉 335 增幅达 1.54%,其次为京农科 728,增幅为 1.26%,表明调节剂对收获出籽率的效应因基因型不同也存在差异。

2.6 调节剂对不同基因型夏玉米品种穗部性状的调控

不同基因型夏玉米品种之间穗长存在显著差异($P<0.05$)(图 4),清水对照条件下,先玉 335 最高,为 21.90 cm,京农科 728 最低,为 16.67 cm。调节剂处理显著增加了不同基因型夏玉米品种穗长,其中京农科 728、先玉 335 增幅高于新单 61,穗长分别增加 9.01%和 2.88%。

不同基因型夏玉米品种间穗粗也存在显著差异($P<0.05$)。清水对照条件下,新单 61 穗粗高于京



注:Control 表示清水对照处理,Treatment 表示调节剂处理。下同。

Note: Control was treated with equal volume of water spraying; Treatment indicates the plant growth regulator applied by foliar-spraying. The same below.

图 1 调节剂对不同基因型夏玉米品种产量构成因子的影响

Fig.1 Effects of plant growth regulator on grain yield components of summer maize with different genotypes

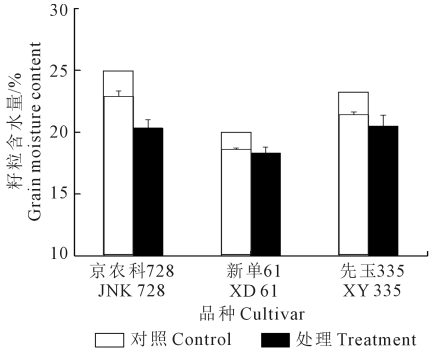


图 2 调节剂对不同基因型夏玉米品种籽粒收获含水量的影响

Fig.2 Effects of plant growth regulator on moisture content of summer maize grain with different genotypes

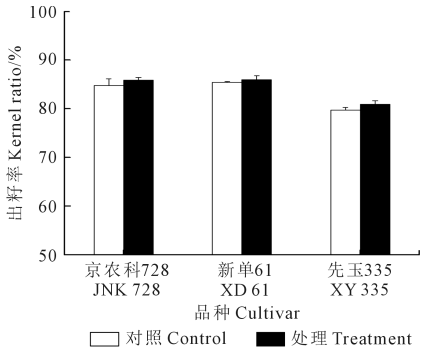


图 3 调节剂对不同基因型夏玉米品种产量收获出籽率的影响

Fig.3 Effects on kernel ratio of summer maize with different genotypes by plant growth regulator

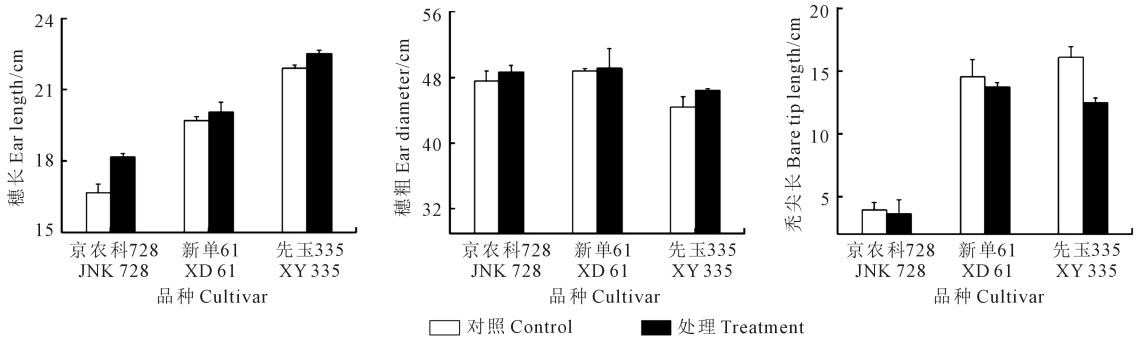


图 4　调节剂对不同基因型夏玉米品种穗部性状的影响

Fig.4　Effects of plant growth regulator on ear traits of summer maize with different genotypes

农科 728、先玉 335,为48.78 mm。调节剂处理显著增加了不同基因型夏玉米品种穗粗,其中,先玉 335 增幅为 4.57%,高于京农科 728、新单 61。

就秃尖长而言,不同基因型夏玉米品种间差异极显著(P<0.01)。清水对照条件下,京农科 728 秃尖最小,为 3.91 mm,先玉 335 最高,为 21.08 mm。调节剂处理显著降低了不同基因型夏玉米品种秃尖长,其中,先玉 335 降幅高于京农科 728、新单 61,秃尖长降幅达 40.80%。以上结果表明调节剂对穗部性状的调控效应与基因型存在互作效应。

2.7　调节剂对不同基因型夏玉米品种倒伏率的调控

不同基因型夏玉米品种之间倒伏率差异显著(P<0.05)(图 5)。清水对照条件下,京农科 728 倒伏最为严重,倒状率高达 7.2%,其次为先玉 335,倒伏率为 5.1%,新单 61 倒伏率最低,仅为 1%。调节剂处理显著降低了不同基因型夏玉米品种倒伏发生,其中,先玉 335 降幅达 90.0%,其次为京农科 728,降幅达 85.7%,表明倒伏率的减少可能是调节剂增产的重要因素之一。

2.8　调节剂对不同基因型夏玉米品种内源激素的调控

不同基因型夏玉米品种之间内源激素 GA_3 含量存在显著差异(P<0.05)(图 6),清水对照条件下,先玉 335 最高,为 1.97 μg · mg $^{-1}$(鲜重含量,下同),京农科 728 最低,为 1.80 μg · mg $^{-1}$。调节剂处理显著增加了不同基因型夏玉米品种内源激素 GA_3 含量,其中,京农科 728、新单 61 增幅分别为 18.51%和 4.06%,高于先玉 335,GA_3 含量达 2.13 μg · mg $^{-1}$和 4.23 μg · mg $^{-1}$。

内源激素 ABA 含量在不同基因型夏玉米品种间也存在显著差异(P<0.05)。清水对照条件下,京农科 728 高于新单 61、先玉 335,为 284.33 μg · mg $^{-1}$。调节剂处理显著降低了不同基因型夏玉米品种

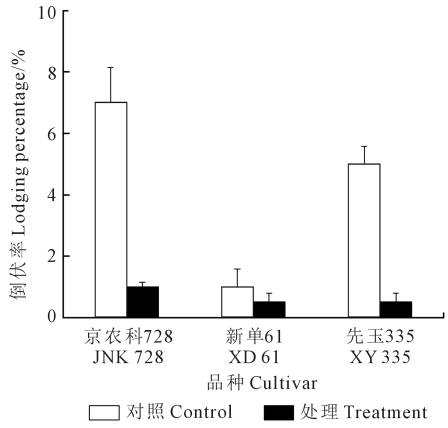


图 5　调节剂对不同基因型夏玉米品种倒伏率的调控

Fig.5　Effects of plant growth regulator on lodging percentage of summer maize with different genotypes

ABA 含量,其中,京农科 728 降幅高于新单 61、先玉 335,ABA 含量降为 253.67 μg · mg $^{-1}$,降幅达 10.78%,新单 61 的 ABA 含量降幅也较大,达 5.97%。结果表明调节剂对内源激素 ABA 含量的调控效应与基因型存在互作。

2.9　调节剂对不同基因型夏玉米品种信号转导关键基因的调控

激素信号转导关键基因 *ZmEIN2* 表达量在不同基因型夏玉米品种间存在显著差异(P<0.05)(图 7)。清水对照条件下,新单 61 最高,为 2.04,京农科 728 最低,为 1.80。调节剂处理增加了基因 *ZmEIN2* 表达量,但其响应在不同基因型夏玉米品种间存在明显差异,其中,京农科 728、先玉 335 增幅高于新单 61,*ZmEIN2* 表达量分别增加了 1.92 和 2.20,增幅分别为 6.48%和 4.60%。

水分利用效率相关的水通道蛋白基因 *ZmTIP3-1* 表达量在不同基因型夏玉米品种间也存在显著差异(P<0.05)(图 7)。清水对照条件下,先玉 335 的 *ZmTIP3-1* 基因表达量高于新单 61、京农科 728,为 1.13。调节剂处理显著增加了不同基因型夏玉米品种 *ZmTIP3-1* 表达量,其中,先玉 335、京农科 728

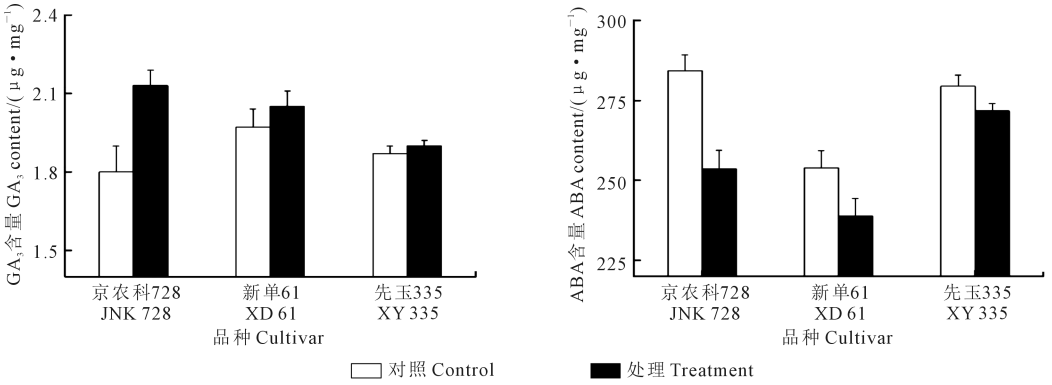


图 6 调节剂对不同基因型夏玉米品种内源激素的调控

Fig.6 Effects of plant growth regulator on endogenous hormones of summer maize with different genotypes

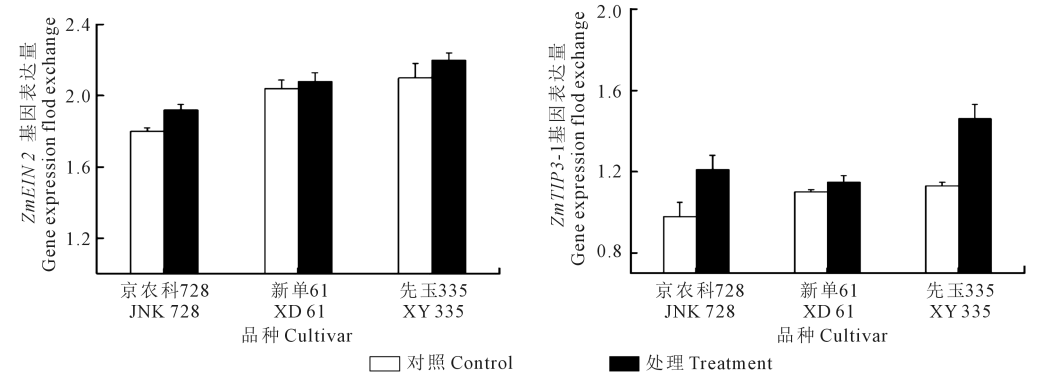


图 7 调节剂对不同基因型夏玉米品种信号转导关键基因的调控

Fig.7 Effects of plant growth regulator on key genes of signal transduction in summer maize with different genotypes

增幅高于新单 61,基因 *ZmTIP*3-1 表达量分别增加到 1.46 和1.21,增幅分别为 29.88%和 22.71%。结果表明调节剂对激素信号转导关键基因存在调控效应。

3 结论与讨论

当前,越来越多的学者认识到非充分灌溉对于农作物节水栽培的重要性[10-11,14-15]。前人的研究也从大田栽培技术措施逐渐深入到室内的生理调控与分子机制[8-11,14]。本研究解析了植物生长调节剂对典型黄淮井灌区夏玉米水分利用效率的调控效应,为非充分灌溉原理与技术拓展出新的思路。本研究表明,植物生长调节剂能显著改善玉米水分利用效率、增加籽粒产量($P<0.05$);不同基因型夏玉米品种对植物生长调节的响应也存在不同:就黄淮井灌区而言,新单 61 具有相对较高的节水增产潜力,而在调节剂的作用下,先玉 335 也能够获得较高的节水增产效果。调节剂的节水增产效应可能在于改变了激素信号转导关键基因表达量,进而使其内源激素如 GA_3、ABA 含量发生了变化,从而降低倒伏率($P<0.05$,降幅最高达 90%),重塑了玉米株型建成。前人研究认为,调节剂对不同基因型品种的增产效应存在差异,穗位高的郑单 958 和先玉 335 处理后产量增幅最大,而穗位低的利民 33 处理后产量最高[16]。本试验结果证实,不同基因型夏玉米品种之间产量水平、水分利用效率存在显著差异,不同基因型品种水分利用效率对调节剂的响应也存在差异。表明栽培生产实践中密植条件下高产夏玉米水资源高效利用与调控应把握好选用品种的特征特性,并据此进一步明晰所选品种、调节剂以及其它当地主要栽培技术之间的互作效应,这一点对于灌区进一步节水增粮具有重要的实践意义。

植物生长调节剂对不同基因型夏玉米品种水分利用效率调控存在差异,但确有提高玉米水分利用效率、增加产量的调控效应,其原因在于重塑了玉米株型建成,减少了倒伏发生。植物生长调节剂调控株型建成,其潜在可能的机制为调节剂通过作用于激素信号转导、水分利用效率相关的水通道蛋白等关键调控基因,使其内源激素如 GA_3、ABA 含量发生了变化,而这些作用与玉米水分利用效率之间的互作机制仍不清晰,需要更进一步的试验进行验证。

(下转第 56 页)