

# 不同化控剂对春玉米根系伤流液特性的影响及其激素调控机制

樊海潮, 顾万荣, 杨德光, 张 倩, 李彩凤, 尉菊萍,  
李文龙, 李 晶, 魏 湜

(东北农业大学农学院, 哈尔滨 150030)

**摘 要:** 以东农 253 为试验材料, 在玉米 6 叶期喷施吨田宝(DTB)、DCPTA 和 ETH 复配剂(KP)两种化控剂, 对照为清水。结果表明, DTB 和 KP 均可提高春玉米根系伤流量, 特别是生育后期的流量, 分别比对照提高了 72.34% 和 129.78%; 提高了伤流液中矿质元素的流量, 氨基酸的总流量也得到相应的提高, 特别是丝氨酸的流量。内源激素 IAA、CTK 和 ABA 流量在各时期均有增加; GA 流量在乳熟期得到显著提高, 拔节期、抽雄吐丝期和灌浆初期均低于对照, 之后得到显著提高。对内源激素比值均有不同程度的影响, 改变了激素间的平衡水平; 提高了行粒数和百粒重, 产量分别比对照提高了 13.89% 和 21.06%。相关性分析表明, 玉米根系伤流量及其组分与产量密切相关, 表明化控剂具有调控根系伤流量、矿质元素和内源激素流量的作用, 对促进地上部生长发育和产量的形成有重要作用。

**关键词:** 春玉米; 根系伤流液; 内源激素

**中图分类号:** S513.01

**文献标识码:** A

## Effects of Mixed Compound of DCPTA and ETH on Root Bleeding Sap Performance of Spring Maize and Hormone Regulation Mechanism

FAN Hai-chao, GU Wan-rong, YANG De-guang, ZHANG Qian, LI Cai-feng, YU Ju-ping,  
LI Wen-long, LI Jing, WEI Shi

(College of Agronomy, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**Abstract:** Two kinds of chemical regulators(DTB and KP) were sprayed on Dongnong253 at the 6-leaf stage, and the control was water. The results showed that the total volume of roots bleeding sap, especially in the later growth stages, and the mineral nutrients and amino acid especially Ser in the root bleeding sap were increased by the treatment of Duntianbao and KP. Under the treatment of Duntianbao and KP, the total volume of roots bleeding sap in the later growth stages was 72.34% and 129.78% higher than that of the control. The content of IAA, CTK and ABA were also promoted in every stage. Whereas the content of GA was significantly improved at the milk stage, and lower than that of control at jointing, anthesis silking and filling stages, which was significantly increased later. Chemical regulators had different effects on the ratio of endogenous hormones and change the balance of hormones. In addition, the use of chemical regulators increased the grain number per row and 100-grain weight, and finally improved the yield. Compared with the control, the actual yield increased by 13.89% and 21.06%, respectively. The correlation analysis showed that, the root bleeding sap and its components were closely related to the yield, indicating that chemical regulators had effects of regulating root bleeding sap, mineral elements and endogenous hormones, which playing an important role in promoting the growth and development of shoots.

**Key words:** Spring maize; Root bleeding sap; Endogenous hormone

**录用日期:** 2017-07-08

**基金项目:** 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金项目(LBH-Q16031)、哈尔滨市应用技术与开发项目(2015RQXXJ046)、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, 主要从事玉米高产栽培技术研究。Tel: 18846828763 E-mail: fanhaichao91@163.com  
魏 湜和顾万荣为本文通讯作者。

根系是玉米吸收水分和养分的重要器官<sup>[1]</sup>,同时也是多种信号物质合成、转化、运输和传导的重要部位,在协调植株各器官生长发育与功能表达方面具有非常重要的地位<sup>[2]</sup>。目前,对玉米根系的形态、结构、功能、时空分布及根系受外界环境的影响等方面已有较详细的研究<sup>[3~7]</sup>。近年来,根系受外界环境的影响方面具有大量深入的研究,其中包括耕作方式、土壤水分状况、施肥方式、土壤温度以及化控剂等因素<sup>[8~15]</sup>。化控剂能够促进根系发育、调控根冠比、改善物质分配以及提高产量。化控剂还可以改善根系内同化物代谢水平,促进根系的正常生长发育,也能明显提高植株的根数和根冠比<sup>[16~18]</sup>。

根系伤流液中的可溶性糖、游离氨基酸和矿质元素等物质的变化是根冠交流的主要形式<sup>[19]</sup>。张明才等<sup>[20]</sup>研究表明,DTA-6能够提高花生的根系活力和根系伤流量以及根系的吸收和合成能力。郑殿峰等<sup>[21]</sup>研究表明,化控剂能够显著提高植株根系中的可溶性蛋白含量,增加根系游离氨基酸的输出量。董学会等<sup>[22]</sup>研究表明,30%己乙水剂能显著提高玉米根系伤流液中矿质元素的流量。伤流液中的内源激素也在根冠交流中起着重要的作用,化控剂通过影响内源激素,达到调控物质运输、协调根冠关系和提高产量的目的。杜召海等<sup>[23]</sup>研究表明,化控剂能够显著提高甘薯根系中的ABA含量和IAA含量。本研究以东农253为试验材料,在6叶期分别喷施吨田宝、DCPTA和ETH复配剂两种化控剂,通过测定伤流液中的各种营养成分和数量,以明确化控剂对玉米根系的吸收能力和合成能力的影响,为黑龙江玉米高产栽培中化控剂应用提供理论和试验依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

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)由东北农业大学农学院自行复配提供;化控剂“吨田宝”(DTB)由黑龙江禾田丰泽兴农业科技开发有限公司提供。

### 1.2 试验设计

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,土壤基础肥力,有机质25.25 g/kg,全氮1.70 g/kg,速效钾179.35 mg/kg,速效磷65.34 mg/kg,碱解氮118.21 mg/kg,土壤pH值为6.85。两年试验分别于4月25日和4月26日播种,9月29日和9月28日收获,种植密度7万株/hm<sup>2</sup>。试验设2个调节剂

处理和1个清水对照(CK)。在玉米6叶期叶面均匀喷施,KP施用浓度为10 mL/L,吨田宝用量为900 mL/hm<sup>2</sup>。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65 cm,株距22 cm,面积52 m<sup>2</sup>,玉米植株共360株。种肥用量,尿素100 kg/hm<sup>2</sup>、磷酸二铵180 kg/hm<sup>2</sup>、硫酸钾50 kg/hm<sup>2</sup>,播种时一次性施入,在拔节期追施尿素100 kg/hm<sup>2</sup>。其他田间管理均按常规进行。

### 1.3 测定项目和方法

根系伤流液收集:分别在玉米拔节期(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个生育时期进行收集。每个小区选取代表性植株3株进行取样,收集时间为下午7:00至次日上午7:00,在试管内填入松紧适度的干燥脱脂棉(约占指形管容积的2/3左右),在第3叶节处用剪刀快速切断植株,然后用去离子水将残茎切口冲洗干净,试管用保鲜膜固定在残茎上,收集12 h。

伤流液量的计算:采用差减法计算伤流液的流量,单株玉米每小时流量=(收集后试管和脱脂棉总重量-收集前试管和干燥脱脂棉总重量)/12 h。

矿质元素的测定:采用等离子体(ICP)法测定<sup>[24]</sup>。

氨基酸的测定:用磺基水杨酸法测定<sup>[25]</sup>。

内源激素的测定:内源激素用间接酶联免疫吸附法(ELISA)测定<sup>[26]</sup>。

产量及其构成因素:完熟期每小区取中间2行玉米,晒干脱粒后称重,并以含水量14%的重量折算产量。另外再取10穗玉米进行考种,调查穗行数、行粒数、百粒重等。

### 1.4 数据处理

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 不同化控剂对玉米根系伤流量的影响

表1结果表明,各处理下玉米根系伤流液在抽雄吐丝期(7月25日)达到最大值。与对照相比,化控剂处理后,玉米根系伤流量显著提高,其中,KP处理在拔节期、抽雄吐丝期、灌浆初期、乳熟期、完熟期分别比对照提高27.27%、25.52%、30.20%、81.30%和129.78%,均达显著水平;吨田宝分别比对照提高18.18%、11.71%、9.41%、45.53%和72.34%,除抽雄吐丝期和灌浆初期之外,其余各时期均达显著水平。化控剂明显提高了玉米生育后期的伤流量,为防止玉米后期早衰及最终产量形成提供保障。

表 1 不同化控剂对玉米根系伤流量的影响

Table 1 Effects of different chemical regulators on root bleeding sap of maize

mL/(h·株)

| 处 理       | 拔节期              | 抽雄吐丝期           | 灌浆初期                | 乳熟期                        | 完熟期        |
|-----------|------------------|-----------------|---------------------|----------------------------|------------|
| Treatment | Elongation stage | Tasseling stage | Early filling stage | Endosperm maturation stage | Maturation |
| CK        | 2.20 c           | 2.39 b          | 2.02 b              | 1.23 c                     | 0.47 c     |
| DTB       | 2.60 b           | 2.67 ab         | 2.21 b              | 1.79 b                     | 0.81 b     |
| KP        | 2.80 a           | 3.00 a          | 2.63 a              | 2.23 a                     | 1.08 a     |

注:同一列中不同的小写字母表示 0.05 水平下差异的显著性。下表同。

Note: The different letters indicated significantly at the 0.05 probability level. The same below.

2.2 不同化控剂对玉米根系伤流中矿质元素流量的影响

表 2 结果表明,在玉米拔节期矿质元素流量最大的是 K、Mg、Ca、P 和 Si;其次是 Zn、Mn、Fe、B;Mo 和 Cu 的流量非常微小。K、Mg 和 B 的流量拔节后一直呈下降趋势;Ca 的流量在抽雄吐丝期达到峰值,随后逐渐降低;P、Mn 的流量动态与 Ca 相似;Zn、Fe 的流量分别在拔节期和灌浆初期出现两个峰值;Si 的流量在拔节期达到高峰,抽雄后变化不明显;Cu、Mo 的流量变化不显著。化控剂处理后矿质元素流量增加,尤其是峰值流量得到显著提高,KP 处理的

矿质元素总量在拔节期、抽雄吐丝期、灌浆初期和乳熟期分别比对照提高 13.95%、35.93%、66.46%和 114.12%,均达显著水平;吨田宝处理分别比对照提高 8.02%、22.78%、47.64%和 64.58%,均达显著水平,KP 处理作用更明显。从各种矿质元素的总趋势来看,矿质元素的流量前期大于后期,特别是在拔节期和抽雄吐丝期出现最大值,可能是因为营养生长和生殖生长的快速时期。化控剂处理后,各类矿质元素的流量显著提高,特别是营养生长与生殖生长转折期,这对果穗分化和子粒形成有重要的作用。

表 2 不同化控剂对玉米根系伤流中矿质元素流量的影响

Table 2 Effects of different chemical regulators on mineral nutrients in root bleeding sap of maize

μL/(h·株)

| 生育时期          | 处 理       | 矿质元素 Mineral element |         |        |        |            |           |         |        |          |         |            | 总 量        |
|---------------|-----------|----------------------|---------|--------|--------|------------|-----------|---------|--------|----------|---------|------------|------------|
| Growth period | Treatment |                      |         |        |        |            |           |         |        |          |         |            | The total  |
|               |           | K                    | Mn      | Cu     | Fe     | Mg         | P         | Zn      | B      | Si       | Mo      | Ca         |            |
| 拔节期           | CK        | 4 468.99 c           | 7.88 b  | 0.03 b | 3.39 c | 914.62 b   | 270.73 c  | 20.31 b | 1.51 c | 101.75 c | 0.11 b  | 801.22 c   | 6 590.54 c |
|               | DTB       | 4 700.05 b           | 11.31 a | 0.03 b | 4.81 b | 955.47 a   | 345.41 b  | 28.21 a | 1.94 b | 122.07 b | 0.14 ab | 949.68 b   | 7 119.12 b |
|               | KP        | 4 957.63 a           | 12.96 a | 0.07 a | 5.46 a | 915.97 b   | 407.74 a  | 31.81 a | 2.20 a | 157.50 a | 0.17 a  | 1 018.22 a | 7 509.73 a |
| 抽雄吐丝期         | CK        | 3 641.60 c           | 11.62 b | 0.04 b | 0.84 b | 634.52 b   | 324.30 b  | 7.79 c  | 1.35 b | 59.54 b  | 0.09 c  | 1 019.52 c | 5 701.21 c |
|               | DTB       | 4 108.63 b           | 20.24 a | 0.08 a | 1.90 a | 1 008.22 a | 361.14 b  | 14.20 b | 2.70 a | 64.56 b  | 0.23 b  | 1 417.98 b | 6 999.88 b |
|               | KP        | 4 534.08 a           | 21.78 a | 0.10 a | 1.86 a | 971.04 a   | 556.86 a  | 19.65 a | 2.96 a | 79.77 a  | 0.37 a  | 1 561.08 a | 7 749.55 a |
| 灌浆初期          | CK        | 2 273.03 b           | 8.67 c  | 0.06 c | 2.30 c | 90.15 c    | 226.97 ab | 16.75 c | 1.05 b | 73.45 a  | 0.15 b  | 566.33 b   | 3 258.91 c |
|               | DTB       | 3 700.34 a           | 13.59 b | 0.10 b | 3.71 b | 237.44 b   | 196.58 b  | 33.04 b | 2.32 a | 59.89 b  | 0.14 b  | 801.90 a   | 4 811.61 b |
|               | KP        | 3 853.58 a           | 18.02 a | 0.15 a | 5.13 a | 324.17 a   | 258.42 a  | 46.42 a | 2.48 a | 64.83 b  | 0.23 a  | 851.20 a   | 5 424.63 a |
| 乳熟期           | CK        | 933.19 c             | 1.53 c  | 0.01 c | 0.84 b | 44.59 c    | 64.19 c   | 3.23 b  | 0.26 b | 57.50 b  | 0.04 b  | 167.86 c   | 1 273.24 c |
|               | DTB       | 1 532.15 b           | 3.85 b  | 0.02 b | 0.88 b | 74.07 b    | 123.81 b  | 13.71 a | 0.94 a | 55.17 b  | 0.17 a  | 290.71 b   | 2 095.48 b |
|               | KP        | 1 909.68 a           | 5.26 a  | 0.03 a | 1.18 a | 125.50 a   | 170.02 a  | 14.67 a | 0.81 a | 80.82 a  | 0.17 a  | 418.10 a   | 2 726.24 a |

2.3 不同化控剂对玉米根系伤流中氨基酸流量的影响

表 3 结果表明,根系向冠层运输的主要是丝氨酸、谷氨酸、赖氨酸和精氨酸;其次是缬氨酸、亮氨酸和丙氨酸;蛋氨酸、甘氨酸流量甚微。除蛋氨酸流量峰值出现在抽雄吐丝期,其他氨基酸均出现在拔节

期;随着生育进程的推进,氨基酸流量逐渐下降。化控剂处理显著提高了氨基酸流量,丝氨酸是伤流液中氨基酸最主要的运输形式,KP 处理在拔节期、抽雄吐丝期、灌浆初期和乳熟期分别比对照提高 63.57%、61.36%、76.23%和 145.37%,差异均达显著水平;吨田宝处理分别比对照提高 47.44%、27.55%、

18.02%和46.67%,差异均达显著水平。KP处理不仅大大提高了拔节期和抽雄吐丝期的氨基酸流量,而且对后期氨基酸流量也有较明显的提高。

2.4 不同化控剂对玉米根系伤流中内源激素流量的影响

表4结果表明,随着生育进程的推进,IAA、ABA、GA、CTK 4种内源激素的流量均为单峰曲线,IAA流量峰值出现在灌浆初期,ABA、GA、CTK流量

峰值均出现在抽雄吐丝期。化控剂处理后,IAA、ABA、CTK流量均显著提高,在流量峰值处KP处理分别比对照提高57.31%、72.56%和47.32%,吨田宝处理分别比对照提高21.24%、29.80%和23.90%。GA流量在乳熟期显著提高,在乳熟期前均低于对照,在流量峰值处KP处理和吨田宝处理分别比对照降低36.30%和44.21%。

表3 不同化控剂对玉米根系伤流中氨基酸流量的影响  
Table 3 Effects of different chemical regulators on amino acid contents in root bleeding sap of maize  $\mu\text{L}/(\text{h}\cdot\text{株})$

| 生育时期<br>Growth period | 处 理<br>Treatment | 氨基酸种类 Amino acid |            |            |            |            |            |            |            |            | 总 量<br>The total |
|-----------------------|------------------|------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------------|
|                       |                  | 丝氨酸<br>Ser       | 谷氨酸<br>Glu | 甘氨酸<br>Gly | 丙氨酸<br>Ala | 缬氨酸<br>Val | 赖氨酸<br>Lys | 蛋氨酸<br>Met | 精氨酸<br>Arg | 亮氨酸<br>Leu |                  |
|                       |                  |                  |            |            |            |            |            |            |            |            |                  |
| 拔节期                   | CK               | 775.19 c         | 370.57 c   | 2.17 c     | 20.52 b    | 77.57 c    | 151.73 c   | 4.67 c     | 121.81 c   | 22.56 c    | 1 546.79 c       |
|                       | DTB              | 1 142.91 b       | 875.37 a   | 2.90 b     | 34.54 a    | 115.91 b   | 198.41 b   | 9.58 b     | 177.99 b   | 37.07 b    | 2 594.68 b       |
|                       | KP               | 1 267.98 a       | 742.42 b   | 3.70 a     | 37.14 a    | 165.10 a   | 247.11 a   | 11.91 a    | 221.07 a   | 48.96 a    | 2 745.39 a       |
| 抽雄吐丝期                 | CK               | 534.50 c         | 291.91 c   | 0.78 b     | 19.64 b    | 53.45 c    | 102.53 b   | 7.20 b     | 115.23 c   | 14.64 c    | 1 139.88 c       |
|                       | DTB              | 681.76 b         | 452.16 b   | 2.39 a     | 22.04 b    | 121.01 b   | 181.97 a   | 10.56 a    | 180.88 b   | 16.70 b    | 1 669.47 b       |
|                       | KP               | 862.47 a         | 505.47 a   | 2.57 a     | 31.10 a    | 141.38 a   | 190.16 a   | 12.22 a    | 199.06 a   | 21.44 a    | 1 965.87 a       |
| 灌浆初期                  | CK               | 316.92 c         | 207.17 b   | 0.43 b     | 12.14 b    | 37.83 c    | 67.91 b    | 4.48 c     | 63.11 c    | 8.62 b     | 718.61 c         |
|                       | DTB              | 374.04 b         | 371.85 a   | 1.64 a     | 22.63 a    | 53.45 b    | 97.71 a    | 5.94 b     | 72.45 b    | 13.98 a    | 1 013.69 b       |
|                       | KP               | 558.51 a         | 348.11 a   | 1.50 a     | 20.66 a    | 66.66 a    | 93.85 a    | 7.06 a     | 105.53 a   | 14.91 a    | 1 216.79 a       |
| 乳熟期                   | CK               | 203.26 c         | 118.55 c   | 0.25 c     | 4.01 c     | 12.81 c    | 22.44 b    | 1.26 c     | 15.21 c    | 4.02 c     | 381.81 c         |
|                       | DTB              | 332.47 b         | 173.88 b   | 0.58 b     | 9.21 b     | 16.56 b    | 54.13 a    | 2.23 b     | 28.00 b    | 14.75 b    | 631.81 b         |
|                       | KP               | 498.74 a         | 190.93 a   | 1.04 a     | 11.62 a    | 27.57 a    | 52.82 a    | 4.35 a     | 107.70 a   | 21.60 a    | 916.37 a         |

表4 不同化控剂对玉米根系伤流中内源激素流量的影响  
Table 4 Effects of different chemical regulators on endogenous hormones in root bleeding sap of maize  $\mu\text{L}/(\text{h}\cdot\text{株})$

| 生育时期<br>Growth period | 处 理<br>Treatment | 内源激素 Endogenous hormones |         |          |          |
|-----------------------|------------------|--------------------------|---------|----------|----------|
|                       |                  | IAA                      | ABA     | GA       | CTK      |
| 拔节期                   | CK               | 139.66 c                 | 16.17 c | 185.61 a | 348.93 c |
|                       | DTB              | 520.36 b                 | 39.53 b | 146.05 b | 480.88 b |
|                       | KP               | 620.06 a                 | 47.30 a | 117.39 c | 709.61 a |
| 抽雄吐丝期                 | CK               | 303.82 c                 | 19.43 c | 312.18 a | 499.65 c |
|                       | DTB              | 618.12 b                 | 25.22 b | 174.16 b | 619.05 b |
|                       | KP               | 709.49 a                 | 33.47 a | 198.86 b | 736.07 a |
| 灌浆初期                  | CK               | 691.28 c                 | 10.13 c | 161.65 a | 278.28 c |
|                       | DTB              | 838.12 b                 | 13.89 b | 129.69 b | 351.67 b |
|                       | KP               | 1 087.42 a               | 23.89 a | 126.10 c | 413.04 a |
| 乳熟期                   | CK               | 145.92 c                 | 6.52 c  | 55.24 c  | 159.31 c |
|                       | DTB              | 215.64 b                 | 16.80 b | 137.32 b | 281.68 b |
|                       | KP               | 452.85 a                 | 29.60 a | 157.13 a | 356.50 a |

2.5 不同化控剂对玉米根系伤流中内源激素比值的影响

表5结果表明,随着生育进程的推进,IAA/ABA、GA/ABA和CTK/ABA的比值先升高后降低,GA/IAA、

CTK/IAA和CTK/GA的比值先降低后升高。化控剂处理后,和对照相比,IAA/ABA的比值在拔节期和抽雄吐丝期显著升高,在灌浆初期和乳熟期显著下降;GA/ABA和CTK/ABA的比值在各个生育时期均

下降;GA/IAA的比值除吨田宝处理在乳熟期显著升高外,其余均下降;CTK/IAA的比值除吨田宝处理在灌浆初期和乳熟期显著升高外,其余均下降;CTK/GA的比值除在乳熟期下降外,其余均升高。KP处理条件下,IAA/ABA、GA/ABA、CTK/ABA、GA/IAA、CTK/IAA和CTK/GA的比值变化区间分别为13.11~45.52、2.48~5.94、12.04~21.99、0.12~0.35、

0.38~1.14和2.27~6.04;吨田宝处理条件下,变化区间分别为12.84~60.34、3.69~9.34、12.16~25.32、0.15~0.64、0.42~1.31和2.05~3.55;对照变化区间分别为8.64~68.24、8.47~16.07、21.58~27.47、0.23~1.33、0.40~2.50和1.60~2.88。由此可见,两个化控剂处理对内源激素比值均有不同程度的影响,改变了激素间平衡水平。

表5 不同化控剂对玉米根系伤流中内源激素比值的影响

Table 5 Effects of different chemical regulators on the ratio of endogenous hormones in root bleeding sap of maize

| 生育时期<br>Growth period | 处 理<br>Treatment | 项目 Item |         |         |        |         |         |
|-----------------------|------------------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|
|                       |                  | IAA/ABA | GA/ABA  | CTK/ABA | GA/IAA | CTK/IAA | CTK/GA  |
| 拔节期                   | CK               | 8.64 b  | 11.48 a | 21.58 a | 1.33 a | 2.50 a  | 1.88 c  |
|                       | DTB              | 13.16 a | 3.69 b  | 12.16 c | 0.28 b | 0.92 c  | 3.29 b  |
|                       | KP               | 13.11 a | 2.48 b  | 15.00 b | 0.19 b | 1.14 b  | 6.04 a  |
| 抽雄吐丝期                 | CK               | 15.64 c | 16.07 a | 25.72 a | 1.03 a | 1.64 a  | 1.60 b  |
|                       | DTB              | 24.51 a | 6.91 b  | 24.55 a | 0.28 b | 1.00 b  | 3.55 a  |
|                       | KP               | 21.20 b | 5.94 b  | 21.99 b | 0.28 b | 1.04 b  | 3.70 a  |
| 灌浆初期                  | CK               | 68.24 a | 15.96 a | 27.47 a | 0.23 a | 0.40 a  | 1.72 c  |
|                       | DTB              | 60.34 b | 9.34 b  | 25.32 a | 0.15 b | 0.42 a  | 2.71 b  |
|                       | KP               | 45.52 c | 5.28 c  | 17.29 b | 0.12 b | 0.38 a  | 3.28 a  |
| 乳熟期                   | CK               | 22.38 a | 8.47 a  | 24.43 a | 0.38 b | 1.09 b  | 2.88 a  |
|                       | DTB              | 12.84 c | 8.17 a  | 16.77 b | 0.64 a | 1.31 a  | 2.05 b  |
|                       | KP               | 15.30 b | 5.31 b  | 12.04 c | 0.35 b | 0.79 c  | 2.27 ab |

2.6 不同化控剂对玉米产量及其构成因素的影响

表6结果表明,从产量上来看,化控剂处理后,玉米产量显著增加,和对照相比,吨田宝处理和KP处理的产量分别提高13.89%和21.06%,且差异达显

著水平。从产量的构成因素来看,化控剂处理后,对有效穗数和穗行数的影响不大,行粒数和百粒重显著增加。

表6 不同化控剂对玉米产量及其构成因素的影响

Table 6 Effects of different chemical regulators on yield and yield components of maize

| 处 理<br>Treatment | 有效穗数(穗/hm <sup>2</sup> )<br>Effective ears | 穗行数(行)<br>Ear rows | 行粒数(粒)<br>Row grains | 百粒重(g)<br>100-grain weight | 理论产量(kg/hm <sup>2</sup> )<br>Theoretic yield | 实际产量 (kg/hm <sup>2</sup> )<br>Actual yield |
|------------------|--------------------------------------------|--------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------|
| CK               | 6 689.53 a                                 | 14.62 a            | 38.46 b              | 32.53 b                    | 10 025.71 c                                  | 9 154.79 c                                 |
| 吨田宝              | 6 708.34 a                                 | 14.69 a            | 40.83 ab             | 33.81 ab                   | 11 242.36 b                                  | 10 426.53 b                                |
| KP               | 6 753.92 a                                 | 14.81 a            | 41.91 a              | 34.58 a                    | 11 980.73 a                                  | 11 083.24 a                                |

表7 根系伤流量及其组分与产量的相关性分析

Table 7 The correlation analysis between root bleeding sap and its components

| 生育时期<br>Growth period | 伤流量<br>Bleeding sap | 矿质元素<br>Mineral element | 氨基酸<br>Amino acid | IAA    | ABA    | GA      | CTK    |
|-----------------------|---------------------|-------------------------|-------------------|--------|--------|---------|--------|
| 拔节期                   | 0.93**              | 0.96**                  | 0.92**            | 0.96** | 0.97** | -0.97** | 0.90** |
| 抽雄吐丝期                 | 0.93**              | 0.93**                  | 0.89**            | 0.94** | 0.90** | -0.91** | 0.94** |
| 灌浆初期                  | 0.89**              | 0.95**                  | 0.97**            | 0.95** | 0.91** | -0.97** | 0.75*  |
| 乳熟期                   | 0.99**              | 0.87**                  | 0.79**            | 0.78** | 0.95** | 0.75*   | 0.84** |

注: \*、\*\* 分别表示 0.05、0.01 水平下差异显著。  
Note: \* and \*\* indicated significance at 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

表7结果表明,在玉米4个生育时期中,玉米根系伤流量、矿质元素和氨基酸流量与产量呈极显著正相关,其中,伤流量在乳熟期与产量相关性最大;矿质元素在拔节期与产量相关性最大;氨基酸在灌浆初期与产量相关性最大。内源激素IAA、ABA和CTK流量与产量呈显著或极显著正相关;GA流量在拔节期、抽雄吐丝期和灌浆初期与产量呈极显著负相关,在乳熟期呈显著正相关。提高根系伤流量、矿质元素、氨基酸、IAA、ABA、CTK的流量,降低乳熟期前GA的流量,有利于促进产量的形成。

### 3 结论与讨论

根系从地下部吸收的无机离子和水分,除了满足根系自身生长发育外,还通过木质部流向地上部。伤流量的多少反映了植物主动吸收水分能力的强弱,植物伤流的多少代表了根系生理活动的强弱<sup>[27]</sup>。研究表明,根系伤流强度可作为根系活力的指标,可以说明根系活力的变化<sup>[28]</sup>。董学会等<sup>[29]</sup>研究表明,喷施30%己乙水剂能够增加玉米的根量,提高根系伤流量和根系活力。本研究表明,根系伤流量与产量均呈极显著正相关,与对照相比,化控剂处理提高了玉米根系伤流量,特别是灌浆后伤流量显著增加,而KP处理较吨田宝更为突出。

植物通过木质部从根系向地上部运输水分、矿质元素、氨基酸及信号物质<sup>[30]</sup>,矿质元素对植物的生长发育具有重要的作用,所以伤流液中矿质元素是根系活力和根-冠相关关系的重要指标<sup>[31]</sup>,影响根系吸收矿质元素有多种因素,其中包括土壤的温度、酸碱度、通气状况和水分含量等。近年来研究发现,乙烯利-缩节安复配剂和30%己乙水剂等化控剂能够显著提高伤流液中矿质元素的流量的作用<sup>[32]</sup>。本研究表明,矿质元素总流量与产量在各个测定时期均呈极显著正相关,伤流液中K的流量最大,Mg、Ca、P、Si、Zn次之,而B、Fe、Cu的流量甚微,可能与玉米自身的需素规律有关。化控剂处理后,显著提高了玉米各个时期的矿质元素流量,KP处理相比吨田宝处理,显著提高了营养生长与生殖生长转折期矿质元素的流量,对果穗分化和子粒形成有重要的作用。

玉米根系是氨基酸重要的转化、合成器官,将合成的部分氨基酸用于自身的生长发育,另一部分提供给地上部合成蛋白质,根系伤流液中的氨基酸流量的变化反映了根系氮素吸收同化水平和玉米的氮循环水平,植物体内氨基酸的合成与代谢受多种因素的影响。武永军等<sup>[33]</sup>研究发现,缺氮时玉米根系的丝氨酸、谷氨酸、苏氨酸、天冬氨酸、脯氨酸、甘氨

酸和丙氨酸的含量明显下降。常二华等<sup>[34]</sup>研究表明,与对照相比,结实期氮素胁迫显著降低了根系和子粒中氨基酸的含量;磷胁迫则显著增加了根系酸、中性氨基酸的分泌,但显著降低子粒氨基酸的含量。本研究表明,氨基酸总流量与产量在各个测定时期均呈极显著正相关,化控剂处理显著提高了氨基酸流量。与吨田宝处理相比,KP处理不仅大大提高了拔节期和抽雄吐丝期的氨基酸流量,而且对后期氨基酸流量的下降也有比较明显的缓解作用,为前期子粒形成和后期灌浆提供了物质保障。

现在已知IAA、ABA、GA、CTK均能在根系合成,对根系的生长和根冠间的信息交流起重要的调控作用<sup>[35]</sup>。任何一个生理过程都不会只受一个植物激素的调节,植物激素之间具有复杂的相互关系。这种相互关系比较复杂,可以是两个或多个激素共同诱导一个生理反应,也可以是一个激素诱导另一个激素的合成或释放,从而诱导某种生理反应。Pilet等<sup>[36]</sup>研究发现,玉米根系对IAA的浓度存在阈值,高浓度的IAA抑制根系的生长。有大量研究表明,高浓度的IAA能够促进侧根和不定根的发生<sup>[37,38]</sup>。本研究表明,内源激素与产量在各个测定时期均呈显著相关,化控剂处理后,显著提高了伤流液中IAA的浓度,促进侧根的发生,输送到地上部,进而调控根冠关系。化控剂处理后,也显著提高了CTK的浓度,在抽雄吐丝期达到流量高峰期,相比IAA的流量峰值有所提前,乳熟期前GA流量低于对照,之后高于对照,而根系输出IAA、CTK和GA流量的提高可能影响地上部生理活性,进一步影响玉米的产量和品质。本研究表明,ABA的流量一直维持在较低水平,化控剂处理后ABA的流量得到显著提高,化控剂处理后,提高了行粒数和百粒重,提高了玉米产量。在多种激素调控的生理过程中,决定生理效应的往往不是某种激素的绝对量,而是各种激素间的相对含量。前人研究表明,GA/ABA比值影响着节间伸长生长,GA/IAA比值影响着木质素的合成能力及韧皮部和木质部的分化,CTK/IAA比值影响着根和芽的分化,CTK/ABA比值对叶绿素总含量产生重要的影响<sup>[39]</sup>。本研究结果表明,化控剂影响玉米根系内源激素间的比值变化,改变了激素间的平衡水平,不同生育时期的平衡水平不同,这可能与化控剂影响了激素的合成时期、合成部位和运输途径有关。

#### 参考文献:

- [1] 宋海星,李生秀.根系的吸收作用及土壤水分对硝态氮、铵态氮分布的影响[J].中国农业科学,2005,38(1):96-101.

- Song H X, Li S X. Effects of root uptake function and soil water on  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  and  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  distribution[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(1): 96–101. (in Chinese)
- [2] 娄成后. 植物水分平衡中根冠间的信号传递与整体行动[J]. *植物学通报*, 2000, 17(5): 475–477.
- Lou C H. Signal transport and integral behavior in maintaining water economy in higher plant[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2000, 17(5): 475–477. (in Chinese)
- [3] 张瑞富, 杨恒山, 高聚林, 等. 深松对春玉米根系形态特征和生理特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(5): 78–84.
- Zhang R F, Yang H S, Gao J L, et al. Effect of subsoiling on root morphological and physiological characteristics of spring maize[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(5): 78–84. (in Chinese)
- [4] 齐文增, 刘惠惠, 李耕, 等. 超高产夏玉米根系时空分布特性[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(1): 69–76.
- Qi W Z, Liu H H, Li G, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of super-high-yield summer maize root[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(1): 69–76. (in Chinese)
- [5] 张旭东, 王智威, 韩清芳, 等. 玉米早期根系构型及其生理特性对土壤水分的响应[J]. *生态学报*, 2016, 36(10): 2969–2977.
- Zhang X D, Wang Z W, Han Q F, et al. Effects of water stress on the root structure and physiological characteristics of early-stage maize[J]. *Acat Ecologica Sinica*, 2016, 36(10): 2969–2977. (in Chinese)
- [6] 姜琳琳, 韩立思, 韩晓日, 等. 氮素对玉米幼苗生长、根系形态及氮素吸收利用效率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 11(1): 247–253.
- Jiang L L, Han L S, Han X R, et al. Effects of nitrogen on growth, root morphological traits, nitrogen uptake and utilization efficiency of maize seedlings[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 11(1): 247–253. (in Chinese)
- [7] 李潮海, 李胜利, 王群, 等. 不同质地土壤对玉米根系生长动态的影响[J]. *中国农业科学*, 2004, 37(9): 1334–1340.
- Li C H, Li S L, Wang Q, et al. Effect of different textural soils on root dynamic growth in corn[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(9): 1334–1340. (in Chinese)
- [8] 马立婷, 王沔, 田平, 等. 耕作方式与玉米根系功能及其保护酶活性关系研究[J]. *玉米科学*, 2017, 25(1): 1–8.
- Ma L T, Wang F, Tian P, et al. Study on the relationship between tillage patterns and the function and protective enzyme activity of root in maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2017, 25(1): 1–8. (in Chinese)
- [9] 李冬梅, 郭华, 朱海燕, 等. 耕作方式对玉米生长发育、根分布及产量形成的影响[J]. *玉米科学*, 2014, 22(5): 115–119.
- Li D M, Guo H, Zhu H Y, et al. Effect of different tillage on the development, root distribution and yield in maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2014, 22(5): 115–119. (in Chinese)
- [10] 牛晓丽, 胡田田, 刘亭亭, 等. 适度局部水分胁迫提高玉米根系吸水能力[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(22): 80–86.
- Niu X L, Hu T T, Liu T T, et al. Appropriate partial water stress improving maize root absorbing capacity[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(22): 80–86. (in Chinese)
- [11] 马旭凤, 于涛, 汪李宏, 等. 苗期水分亏缺对玉米根系发育及解剖结构的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(7): 1731–1736.
- Ma X F, Yu T, Wang L H, et al. Effects of water deficit at seedling stage on maize root development and anatomical structure[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(7): 1731–1736. (in Chinese)
- [12] 牛晓丽, 胡田田, 张富仓, 等. 局部恢复水氮供应对玉米根系氮素吸收与分配的影响[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(14): 2737–2750.
- Niu X L, Hu T T, Zhang F C, et al. Effects of partial water and nitrogen resupplies on maize root nitrogen absorbing capacity and distribution[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(14): 2737–2750. (in Chinese)
- [13] 王贺, 白由路, 杨俐苹, 等. 磷、钾肥施用位置对夏玉米苗期生长发育的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2013(1): 53–58.
- Wang H, Bai Y L, Yang L P, et al. The effects of phosphate and potassium fertilizer placement on growth of summer maize seedling[J]. *Soil and fertilizer in China*, 2013(1): 53–58. (in Chinese)
- [14] 乐章燕, 刘晶淼, 廖荣伟, 等. 土壤温湿度对玉米根系的影响[J]. *玉米科学*, 2013, 21(6): 68–72.
- Le Z Y, Liu J M, Liao R W, et al. Effect of soil temperature and humidity on different developmental periods of corn root[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2013, 21(6): 68–72. (in Chinese)
- [15] 杨青华, 赵宇, 邵瑞鑫, 等. 不同植物生长调节物质对玉米根系衰老及产量的影响[J]. *华北农学报*, 2012, 27(1): 134–139.
- Yang Q H, Zhao Y, Shao R X, et al. Effects of different plant growth regulators on decrepitude index of root system and yield of Maize[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2012, 27(1): 134–139. (in Chinese)
- [16] 张鑫, 翟瑞常, 郑殿峰, 等. 化控剂对大豆根系氮代谢相关指标的影响[J]. *大豆科学*, 2010, 29(3): 433–436.
- Zhang X, Zhai R C, Deng D F, et al. Effects of plant growth regulators(PGRs) on nitrogen metabolism related indicators in soybean roots[J]. *Soybean Science*, 2010, 29(3): 433–436. (in Chinese)
- [17] 赵黎明, 郑殿峰, 冯乃杰, 等. 不同化控剂对大豆根系生理代谢的影响[J]. *大豆科学*, 2008, 27(2): 242–246.
- Zhao L M, Deng D F, Feng N J, et al. Effects of different growth regulators(PGRs) on metabolism in soybean roots[J]. *Soybean Science*, 2008, 27(2): 242–246. (in Chinese)
- [18] 叶德练, 管大海, 张钰石, 等. 雨养条件下化控剂对冬小麦根系生长和产量形成的调控研究[J]. *华北农学报*, 2016, 31(2): 125–130.
- Ye D L, Guan D H, Zhang Y S, et al. Effect of plant growth regulator on the root growth and yield formation of winter wheat under rain-fed condition[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2016, 31(2): 125–130. (in Chinese)
- [19] Xu H Y, Zhou F J, Bai K D, et al. Effects of allantoin on the root growth and bleeding liquid of maize seedlings[J]. *Journal of Agricultural and Biological Science*, 2003, 22(1): 25–28.
- [20] 张明才, 何钟佩, 田晓莉, 等. 化控剂 DTA-6 对花生产量、品质及其根系生理调控研究[J]. *农药学报*, 2003, 5(4): 47–52.
- Zhang M C, He Z P, Tian X L, et al. Regulation of plant growth regulator DTA-6 on peanut yield and quality and its root physiology

- [J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2003, 5(4): 47–52. (in Chinese)
- [21] 郑殿峰, 赵黎明, 冯乃杰, 等. 化控剂对大豆根系同化物及内源激素代谢的影响[J]. 华北农学报, 2008, 23(2): 12–16.
- Zheng D F, Zhao L M, Feng N J, et al. Effects of different plant growth regulators(PGRs) on metabolism of assimilation material and endogenous hormones in soybean roots[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2008, 23(2): 12–16. (in Chinese)
- [22] 董学会, 段留生, 何钟佩, 等. 30%己乙水剂对玉米根系伤流液及其组分的影响[J]. 西北植物学报, 2005, 25(3): 587–591.
- Dong X H, Duan L S, He Z P, et al. Effects of 30% diethyl-amino-ethyle-hexanoate ethephon soluble concentrate on roots bleeding sap and its components of *zea mays*[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2005, 25(3): 587–591. (in Chinese)
- [23] 杜召海, 汪宝卿, 解备涛, 等. 模拟干旱条件下化控剂对夏薯苗期根系生理生化特性的影响[J]. 西北农业学报, 2014, 23(10): 97–104.
- Du Z H, Wang B Q, Xie B T, et al. Effects of plant growth regulators on physiological and biochemical characteristics of roots in summer sweetpotato seedlings under simulated drought stress[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2014, 23(10): 97–104. (in Chinese)
- [24] Xu X D, He H J, Xue Y. Study on the determination 18 mineral elements in vegetables by ICP–AES[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 1994, 14(3): 67–70.
- [25] Zhang J H, Wu Y, Hou J H. Determination of the contents of free amino acids in *Sophora alopecuroides* Linn[J]. Amino Acids & Biotic Resources, 1997, 19(4): 39–40.
- [26] 何钟佩. 农作物化学控制实验指导[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1993.
- [27] 常江, 张自立, 郜红建, 等. 外源稀土对水稻伤流组分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(5): 522–525.
- Chang J, Zhang Z L, Gao H J, et al. Effect of rare earth on composition of bleeding sap of rice[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(5): 522–525. (in Chinese)
- [28] 白书农, 肖翊华. 杂交水稻根系生长与呼吸强度的研究[J]. 作物学报, 1988, 14(1): 53–59.
- Bai S N, Xiao X H. Study on the roots growth and respiration of hybrid rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 1988, 14(1): 53–59. (in Chinese)
- [29] 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): 116–121.
- Dong X H, Duan L S, He Z P, et al. Effects of 30% Diethyl-Amino-Ethyle-Hexanoate Ethephon aqueous solution on physiological activities of maize roots[J]. Acta Agronomica Sinica, 2005, 31(11): 116–121. (in Chinese)
- [30] Irfan M, Hayat S, Hayat Q, et al. Physiological and biochemical changes in plants under waterlogging[J]. Protoplasma, 2010, 241: 3–17.
- [31] 段留生, 张明才, 董学会, 等. 等离子体原子发射光谱法(ICP–AES)测定玉米和大豆根系伤流液中无机元素流量[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(11): 2671–2673.
- Duan L S, Zhang M C, Dong X H, et al. Application of ICP–AES to detection of inorganic elements in roots bleeding sap from maize and soybean plants[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(11): 2671–2673. (in Chinese)
- [32] 李建民, 董学会, 何钟, 等. 乙烯利–缩节安复配剂对夏玉米根系伤流液的影响[J]. 玉米科学, 2005, 13(3): 80–82, 85.
- Li J M, Dong X H, He Z, et al. Effects of mixture compound of ethephon and mapiquat chloride on root exudates of summer corn[J]. Journal of Maize Sciences, 2005, 13(3): 80–82, 85. (in Chinese)
- [33] 武永军, 沈玉芳, 颜秦峰, 等. 缺氮复氮处理对玉米根系生长、根系活力、硝态氮及氨基酸含量的影响[J]. 西北农业学报, 2012, 21(12): 61–64.
- Wu Y J, Shen Y F, Yan Q F, et al. Effect of deficiency and N recovery treatment on root growth, root activity, content of  $\text{NO}_3^-$ -N and amino acids[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2012, 21(12): 61–64. (in Chinese)
- [34] 常二华, 张慎凤, 王志琴, 等. 结实期氮磷营养水平对水稻根系和子粒氨基酸含量的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(4): 612–618.
- Chang E H, Zhang S F, Wang Z Q, et al. Effect of nitrogen and phosphorus on the amino acids in root exudates and grains of rice during grain filling[J]. Acta Agronomica Sinica, 2008, 34(4): 612–618. (in Chinese)
- [35] 何仲佩. 作物激素生理及化学控制[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 1997.
- [36] Pilet P E, Saugy M. Effect on root growth of endogenous and applied IAA and ABA, A critical reexamination[J]. Plant Physiol. 1987, 83(1): 33–40.
- [37] 刘大同, 荆彦平, 李栋梁, 等. 植物侧根发育的研究进展[J]. 植物生理学报, 2013, 49(11): 1127–1137.
- Liu D T, Jing Y P, Li D L, et al. Research advances in plant lateral root development[J]. Journal of Plant Physiology, 2013, 49(11): 1127–1137. (in Chinese)
- [38] 张志勇, 王素芳, 田晓莉, 等. 生长素调节植物侧根发育过程的机制[J]. 作物杂志, 2009(1): 11–13.
- Zhang Z Y, Wang S F, Tian X L, et al. Mechanisms of regulation of auxin on plant lateral root development[J]. Corps, 2009(1): 11–13. (in Chinese)
- [39] 卫晓轶, 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.
- Wei X T, Zhang M C, Zhang Y, et al. Effects of ethephon on internode elongation and endogenous hormones in different genotypes of maize[J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2011, 13(5): 475–479. (in Chinese)

(责任编辑: 朴红梅)