

# 磷酸胆碱合剂对不同种植密度玉米 叶片衰老生理的影响

解振兴<sup>1</sup> 董志强<sup>1</sup> 兰宏亮<sup>1</sup> 高娇<sup>1</sup> 朱平<sup>2</sup> 彭畅<sup>2</sup>

(1. 中国农业科学院作物科学研究所/农业部作物生理生态与栽培重点开放实验室,北京 100081;

2. 吉林省农业科学院环境与资源研究中心,吉林 公主岭 136100)

**摘要:**针对东北地区低温冷凉气候区密植条件下玉米叶片早衰现象,于大田条件下,研究了不同种植密度下磷酸胆碱合剂对京单28和先玉335叶片衰老相关指标及产量性状的影响。结果表明,随种植密度增加,玉米叶片保绿度、叶绿素含量下降;超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性降低,丙二醛(MDA)含量升高。化控处理后,不同种植密度下,2个玉米品种叶绿素含量提高了6.57%~23.40%,保绿度提高了4.5%~13.9%;SOD、POD、CAT活性在中高密度条件下较对照升高了4.76%~21.64%,MDA含量较对照降低4.39%~11.82%;穗长、行粒数、百粒重和产量均较对照有所增加,京单28产量最高增加了398.3kg/hm<sup>2</sup>,先玉335产量最高增加了774.2kg/hm<sup>2</sup>。以不同品种不同密度下的各生理指标与产量进行相关分析,结果表明除MDA含量与产量呈极显著负相关外( $r = -0.810^{**}$ ),其余都表现出正相关,其中POD活性( $r = 0.660^{*}$ )达到了显著水平。表明磷酸胆碱合剂可以延缓玉米叶片的衰老。

**关键词:**玉米;化学调控剂;衰老生理;产量

## EFFECT OF ECK MIXTURE TREATMENT ON MAIZE LEAF SENESCENCE UNDER DIFFERENT PLANTING DENSITIES

XIE Zhen-xing<sup>1</sup> DONG Zhi-qiang<sup>1</sup> LAN Hong-liang<sup>1</sup> GAO Jiao<sup>1</sup> ZHU Ping<sup>2</sup> PENG Chang<sup>2</sup>

(1. Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Crop Eco-physiology and

Cultivation, Ministry of Agriculture, Beijing 100081; 2. Center of Resource and Environmental

Science, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Gongzhuling, Jilin 136100)

**Abstract:** Effects of plant growth regulator ethylene-CCC-PASPK (ECK) on leaf senescence physiology and yield characters were investigated under different planting densities of Jingdan 28 and Xianyu 335 in the field condition. Results indicated that leaf stay-green degree, chlorophyll content, activities of superoxide dismutase (SOD), peroxides (POD), hydrogen peroxidase (CAT) decreased and malondialdehyde (MDA) content increased with planting density increasing. Chlorophyll content was improved by 6.57%~23.40% under plant growth regulator (RGR) treatment and the stay-green degree increased by 4.5%~13.9%. The activities of SOD, POD and CAT were enhanced while MDA content was reduced under mid and high planting densities compared with control. PGR treatment also enhanced ear-length, grain number per row and 100-kernels weight as well as maize yield. And the yield in Jingdan 28 increased by 398.3kg/hm<sup>2</sup> with 774.2kg/hm<sup>2</sup> density of Xianyu 335. Furthermore, positive correlation was found between activities

收稿日期:2011-03-23 接受日期:2011-05-25

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2009CB118601),国家支撑计划(2006BAD02A13-4)

作者简介:解振兴(1981-),男,河南项城人,硕士。E-mail: xzhenxing@china.com.cn

通讯作者:董志强(1964-),男,河北武邑人,研究员,从事作物生理栽培与化学调控研究。Tel: 010-82106043;E-mail: dongzhiqiang@126.com

of SOD, POD ( $r = 0.660^*$ ), CAT, chlorophyll content and yield, while negative correlation was observed in MDA content and yield ( $r = -0.810^{**}$ ). Thus, we conclude that ECK can slow maize leaf aging and oxidation.

**Key words:** maize; chemical regulation; senescence physiology; yield

增加种植密度是玉米获得高产的有效途径之一。国内外目前报道的作物高产记录,都是在增加密度的基础上,配套适宜的水肥调控技术而实现的<sup>[1]</sup>。其中,世界单季玉米产量最高纪录为 27754.5 kg/hm<sup>2</sup>,其收获密度为 108900 株/hm<sup>2</sup>,我国东北春玉米最高纪录为 17256 kg/hm<sup>2</sup>,实际收获密度在 9.3 万株/hm<sup>2</sup> 以上<sup>[2,3]</sup>。但是,增加种植密度会带来诸多不利因素,如随着密度的增加,玉米田间群体郁闭,通风透光性能减弱,茎秆发育差,易倒伏<sup>[4]</sup>;叶片叶绿素和可溶性蛋白含量下降,叶片功能期缩短,叶肉细胞透性增加,膜质过氧化水平升高,光合产物的同化能力降低<sup>[5,6]</sup>,叶片易早衰;高密度引起根系对土壤水分和养分的竞争,根系活力降低,最终,导致雄穗小花分化及雌穗吐丝进度推迟,籽粒败育率增大,穗粒数减少,产量降低<sup>[4,7]</sup>。因此,增加种植密度会带来群体质量下降的风险。要保障玉米高产稳产,必须在增加种植密度的前提下,提高群体质量。

作物化学调控技术已经在小麦、玉米、棉花等生产实践中得到广泛应用<sup>[8]</sup>,为作物的高产稳产建立了有效的保障平台。在玉米化学调控技术中,主要应用的调节剂为乙烯利及其系列衍生产品<sup>[9~11]</sup>。乙烯利具有缩短节间长度,增加茎秆粗度与强度,增强植株抗倒伏能力的功能<sup>[8,9]</sup>。在叶片功能调控中,董学会等<sup>[10]</sup>叶面喷施 30% 己乙水剂,提高了玉米穗位叶叶绿素含量和光合活性,薛金涛等<sup>[12]</sup>叶面喷施 40% 乙矮水剂提高了玉米的净光合速率;王小春等<sup>[13]</sup>喷施烯效唑有效抑制了叶肉细胞膜透性物质的产生,促进了叶绿素的形成,减缓了玉米叶片的衰老进程,但同时也延缓了玉米的生育进程,延长了玉米的成熟期,造成玉米贪青晚熟。已有研究表明,将经典栽培技术与化学调控技术相结合可以提高玉米密植群体的根系质量和茎秆质量,抗倒防倒效果显著<sup>[4,9~12]</sup>。因此,解决密植群体玉米叶片早衰的问题已成为实现密植群体高产的关键步骤。

胆碱是生物膜的组成部分,是促进质膜流动及提高质膜选择透性的重要媒介。已有研究表明,磷酸胆碱合剂(ECK)具有提高玉米叶片抗逆性的作用<sup>[14]</sup>。本文针对密植群体玉米叶片易衰老的现象,在大田条件下研究了磷酸胆碱合剂对不同密度下玉米叶片衰老生理的调控效应,以期为进一步完善优质高产栽培技术体系,构建高密、优质、高产、稳产群体提供理论与技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料与试验设计

试验于 2009-2010 年在中国农业科学院作物科学研究所公主岭试验站进行,试验耕层土壤(0~20cm) pH6.0,有机质 2.62%,全氮 0.13%,速效氮 125.8 mg/kg,速效磷 24.46 mg/kg,速效钾 187.74 mg/kg。

播种前基施玉米专用肥 600 kg/hm<sup>2</sup>(有效营养元素 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 含量分别为 23%、10%、12%),拔节期追施纯 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 分别为 130.35、80.10 和 100.05 kg/hm<sup>2</sup>。

供试品种为京单 28 和先玉 335(图中用 JD28 和 XY335 表示),裂区设计,主区为 PGR 调节剂处理(TR 表示)和清水对照(CK 表示),副区为种植密度,密度设置为 4.5、5.6、6.75、7.87 和 9 万株/hm<sup>2</sup> 共 5 个处理,等行距种植,行距为 0.6 m,小区面积 36 m<sup>2</sup>,3 次重复。磷酸胆碱合剂于拔节期叶面喷施,浓度为 200 mg/kg。

磷酸胆碱合剂由中国农业科学院作物科学研究所作物栽培生理实验室提供。

### 1.2 测定项目与方法

于玉米灌浆期分 4 次(8月2日、8月12日、8月22日和9月4日)取长势一致的玉米穗位叶片,带回实验室用于各项生理指标的测定。

1.2.1 保绿度<sup>[15]</sup> 保绿度 = 成熟期绿叶面积/吐丝期最大绿叶面积 × 100%。

1.2.2 叶绿素含量的测定 称取 0.1 g 样品,用无水乙醇浸提 24 h 至叶片变白,于 665 和 649 nm 下比色。

1.2.3 SOD、POD、CAT 活性 取 0.5 g 样品,剪碎,于预冷的研钵中研磨成匀浆,提取液为 pH 7.8 的磷酸缓冲液,4℃ 离心取上清液。SOD 活性采用氮蓝四唑(NBT)法测定,以单位鲜重抑制 NBT 光还原相对百分率为 50% 时的酶量作为 1 个酶活力单位(U)、POD 活性采用愈创木酚法,以单位鲜重每分钟吸光值变化 0.1 为 1 个酶活单位(U)、CAT 活性采用 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 法测定,以单位鲜重每分钟吸光值变化 0.01 为 1 个酶活单位(U)<sup>[16]</sup>。

1.2.4 MDA 含量 取 0.5 g 样品,剪碎,于预冷的研

钵中研磨成匀浆,提取液为 pH 7.8 的磷酸缓冲液,离心取 2ml 上清液与 2ml 硫代巴比妥酸 (TBA) 混合,置沸水中 10min,迅速冷却,4℃ 下离心 15min,于 532 和 600nm 比色<sup>[16]</sup>。

1.2.5 产量性状考察 玉米成熟后小区实收计产,同时每小区选代表性玉米果穗 20 穗,考察穗长、穗粗、行粒数、百粒重等产量性状。

### 1.3 数据分析

由于连续 2 年试验一致性较好,本文采用 2010 年试验数据,利用 Microsoft Excel 2003 进行数据整理,SPSS Statistics17.0 进行数据统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 叶片保绿度

保绿度直接反映了玉米叶片的衰老状况。如图 1 结果所示,2 个品种玉米叶片保绿度均随种植密度的增加而呈降低趋势,但保绿度值变化幅度存在品种间差异。其中,京单 28 在 4.50~6.75 万株/hm<sup>2</sup> 范围内变化幅度较小,且均高于 7.87 万株/hm<sup>2</sup> 和 9.00 万株/hm<sup>2</sup>,5 种密度梯度中,5.6 万株/hm<sup>2</sup> 最大保绿度最大,为 75.4%。先玉 335 在 5.60~9.00 万株/hm<sup>2</sup> 密度范围内变化幅度较小,且均小于 4.50 万株/hm<sup>2</sup>,5 种密度梯度中,4.50 万株/hm<sup>2</sup> 最大保绿度最大,为 71.8%。调节剂处理后,京单 28 在 4.5,6.75,7.87 和 9 万株/hm<sup>2</sup> 的种植密度下的叶片保绿度较相应对照显著增加 ( $P < 0.05$ ),依次增加了 7.4%、6.5%、4.5% 和 13.9%,在 5.6 万株/hm<sup>2</sup> 密度下则减少 3.3%。先玉 335 在 4.5 和 5.6 万株/hm<sup>2</sup> 的种植密度下的叶片保绿度较对照减小了 6.8% 和 3.7%,在其余 3 个种植密度下依次增加了 9.4%、12.2% 和 13%。这种现象可能与调节剂处理在低密度下促早熟、高密度下防早衰有关。

### 2.2 灌浆期不同品种小麦叶片叶绿素的含量

叶绿素含量与光合同化能力强弱关系密切。如图 2 所示,先玉 335 和京单 28 的叶绿素含量均随种植密度增加呈下降趋势。京单 28 在 4.5~6.75 万株/hm<sup>2</sup> 的种植密度下叶绿素含量变化不显著,保持在 5.36mg·g<sup>-1</sup>(FW) 左右,进一步增加种植密度则含量降低,在 7.87 和 9 万株/hm<sup>2</sup> 的种植密度下叶绿素分别降低了 17.54% 和 13.81%;先玉 335 叶绿素含量随种植密度增加依次减小,与 4.50 万株/hm<sup>2</sup> 密度相比,5.6、6.75、7.87 和 9.00 万株/hm<sup>2</sup> 密度下降幅分别为 2.41%、12.53%、15.82% 和 16.26%,其中,4.50 万株/hm<sup>2</sup> 与 5.60 万株/hm<sup>2</sup> 差异不显著,其余密度间均达到差异性

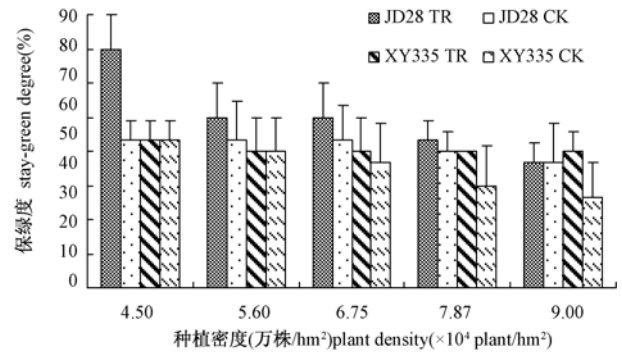


图 1 不同种植密度下玉米叶片保绿度的变化

Fig. 1 Changes of stay-green degree in maize leaves

JD:京单28;XY335;先玉335。TR:PGR处理。所有图同。

JD:Jingdan 28;XY 335;Xianyu335. TR:PGR treatment.

The same as following figures.

显著水平 ( $P < 0.01$ )。调节剂处理提高了 2 个品种各个种植密度下的叶绿素含量。京单 28 的 5 个种植密度处理比相应对照依次提高了 8.30%、6.91%、6.57%、20.89% 和 14.33%,先玉 335 依次提高了 9.12%、8.09%、21.59%、23.40% 和 9.23%,差异均达到显著水平 ( $P < 0.01$ )。

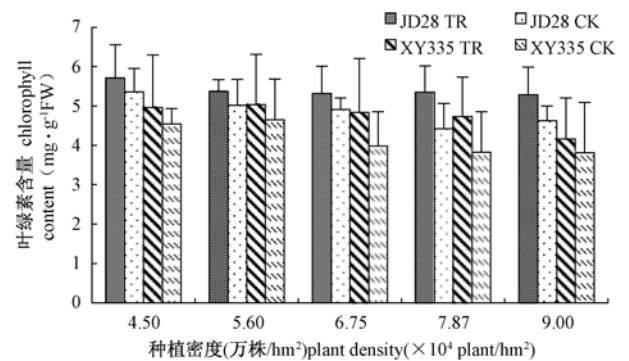


图 2 不同种植密度下灌浆期玉米叶片叶绿素含量的变化

Fig. 2 Changes of chlorophyll content in maize leave at grain filling stage under different planting densities

图中所示数据为 4 次取样(8 月 2 日、8 月 12 日、8 月 22 日和 9 月 4 日)所测的平均值。下图均同。

The data in the figure are mean values of sample collected on Aug. 2, 12, 22 and Sep. 4. The same as following figure.

### 2.3 不同种植密度下玉米叶片保护酶活性

2.3.1 SOD 活性 SOD 可以将超氧阴离子自由基化为 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和水,从而减弱超氧阴离子自由基的毒害<sup>[17]</sup>。从图 3 可以看出,京单 28 和先玉 335 的 SOD 活性随种植密度增加呈减小趋势,其中京单 28 从低密度(4.50 万株/hm<sup>2</sup>)到高密度(9.00 万株/hm<sup>2</sup>)降低了 13.25%,先玉 335 降低了 18.46%。调节剂处理可以

提高2个玉米品种的SOD活性。京单28从4.50~9.00万株/hm<sup>2</sup>5个种植密度下,SOD活性依次为6.71%、9.26%、5.37%、8.29%和5.10%,不同密度间差异达到显著水平( $P < 0.05$ )。先玉335除在9万株/hm<sup>2</sup>的密度下与对照基本相同外,其余种植密度下则较相应对照增加了9.76%~16.76%,统计分析表明差异达显著水平( $P < 0.05$ )。

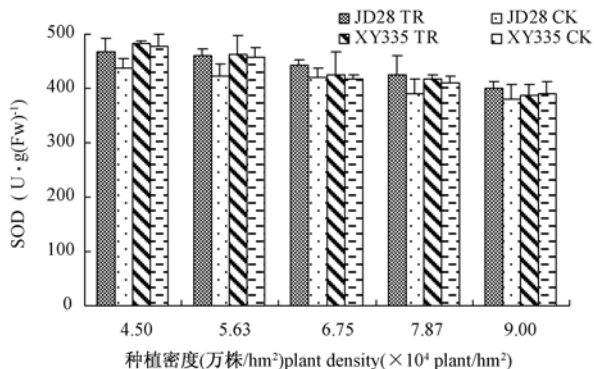


图3 不同种植密度下玉米叶片SOD活性的变化

Fig. 3 Changes of SOD activity in maize leaves under different planting densities

2.3.2 POD活性 POD可以有效清除植株体内产生的有机活性氧和H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>。图4表明,2个品种叶片POD活性均随种植密度的增加呈降低趋势,京单28和先玉335最高降幅分别达到21.64%和17.60%。调节剂处理后2个品种叶片的POD活性变化不同。各种种植密度下京单28叶片POD活性调节剂处理较相应对照升高了9.43%~15.8%,达到显著水平( $P < 0.05$ ),但在6.75和7.87万株/hm<sup>2</sup>的密度下有所降低。先玉335叶片POD活性与相应对照相比,变幅在-0.06%~4.06%之间,差异未达到显著水平。

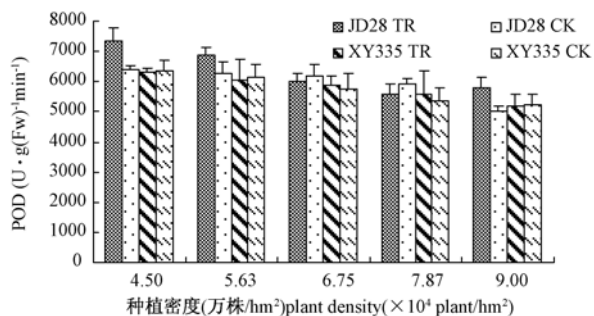


图4 不同种植密度下玉米叶片POD活性的变化

Fig. 4 Changes of POD activity in maize leaves under different planting densities

2.3.3 CAT活性 CAT广泛分布于植物各个组织

中,可以有效清除植物体内H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>的毒害。如图5所示,2个品种小麦叶片的CAT活性随密度增加均呈降低趋势,京单28在4.50~7.87万株/hm<sup>2</sup>的密度下,灌浆期平均CAT活性最低为543.96U·g(Fw)<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup>,最高为566.21U·g(Fw)<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup>,变异系数为3.39%,均显著高于9.00万株/hm<sup>2</sup>的密度。调节剂处理后,除7.87万株/hm<sup>2</sup>密度与对照基本持平外,其余4个种植密度均显著高于对照( $P < 0.05$ ),随密度增加较相应对照依次提高了17.76%、8.84%、8.63%和19.47%。先玉335叶片CAT活性在6.75万株/hm<sup>2</sup>种植密度下最高,达534.41U·g(Fw)<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup>,9万株/hm<sup>2</sup>种植密度下最低,为342.12U·g(Fw)<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup>;调节剂处理后,CAT活性在不同密度间变化各异,在4.5万株/hm<sup>2</sup>的种植密度下较相应对照减小了4.33%,其余种植密度下较对照增加了4.76%~9.97%。

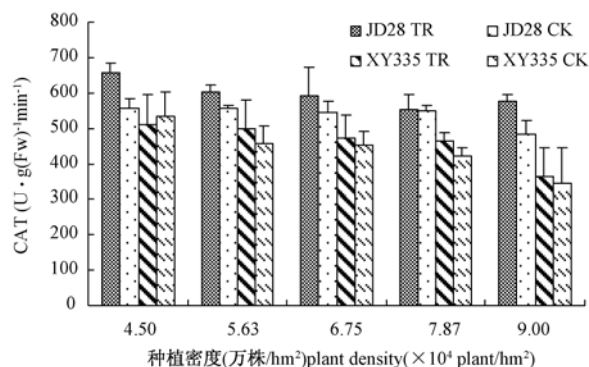


图5 种植密度下不同下玉米叶片CAT活性的变化

Fig. 5 Changes of CAT activity in the maize leaves under different planting densities

## 2.4 MDA含量

MDA是膜脂过氧化的产物,其含量高低反映了植物细胞的受害程度。随着种植密度增加,2个品种玉

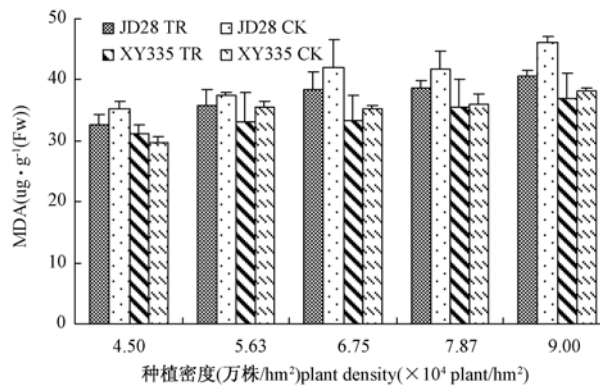


图6 不同种植密度下玉米叶片中丙二醛含量的变化

Fig. 6 Changes of MDA content in maize leaf under different planting densities

米叶片的 MDA 含量呈增加趋势(图 6)。京单 28 和先玉 335 高密度(9.00 万株/hm<sup>2</sup>)与低密度(4.50 万株/hm<sup>2</sup>)间 MDA 含量最大差值分别达到 23.28% 和 16.17%。调节剂处理后 5 种密度下,京单 28 叶片中 MDA 含量较相应对照分别降低了 7.80%、4.39%、8.38%、7.38% 和 11.82%,各个密度下处理与对照差异均达到显著水平( $P < 0.05$ );5 个处理下先玉 335 叶片中 MDA 含量较对照降低了 1.40% ~ 6.66%,但差异不显著。

## 2.5 不同种植密度与 PGR 处理对玉米产量性状的影响

如表 1 所示,随种植密度增加,先玉 335 和京单 28 的穗长、穗粗、行粒数、百粒重均有减小的趋势。调节剂处理后京单 28 上述 4 个指标分别较相应对照平均增加 0.1cm、-0.6mm、0.6 粒和 2.0g,先玉 335 较

对照平均增加 0.3cm、-0.4mm、1.9 粒和 0.1g。种植密度对产量的影响在 2 个品种之间则表现不同。京单 28 产量最高出现在 6.75 万株/hm<sup>2</sup> 的密度下,达到 9948.5kg·hm<sup>-2</sup>,不同种植密度间差异显著;先玉 335 在 5.6 万株/hm<sup>2</sup> 的密度下产量最高为 11049.6kg·hm<sup>-2</sup>,之后随种植密度增加产量有所降低。调节剂处理后,2 个品种不同种植密度处理较相应对照产量有所增加,京单 28 随密度增加依次增加了 398.3, 273.8, 260.5, 40.3 和 268.1kg·hm<sup>-2</sup>,分别为对照的 4.19%、2.76%、2.62%、0.41% 和 2.74%,统计显示,除在 7.87 万株/hm<sup>2</sup> 的密度下没有显著差异,其余种植密度下与对照差异显著。先玉 335 随种植密度依次增加了 385.6, 469.9, 774.2, 679.9 和 497.3kg·hm<sup>-2</sup>,分别为对照的 3.54%、4.25%、7.39%、6.56% 和 4.87%,各个种植密度下都与对照达到显著水平。

表 1 不同种植密度及调节剂处理下玉米产量及产量性状

Table 1 Yield characteristics under different plant density and ECK treatment

品种 variety	密度 density ( $\times 10^4$ plant·hm <sup>-2</sup> )	穗长 ear length (cm)	穗粗 ear diameter (mm)	行粒数 grain number per row	百粒重 100 - kernel weight(g)	产量 yield(kg·hm <sup>-2</sup> )
京单 28 Jingdan 28	4.50	19.5a	50.2a	36.2a	37.51b	9508.3d
	5.60	18.5ab	49.4ab	34.4ab	37.25bc	9931.6b
	6.75	17.2c	48.9ab	30.1cd	36.49bcd	9948.5b
	7.87	15.9d	49.2ab	26.7d	35.04d	9787.9c
	9.00	15.4d	48.4ab	26.7d	34.86d	9784.0c
TR	4.50	19.2a	50.6a	35.4ab	40.51a	9906.6b
	5.62	18.4ab	49.3ab	33.7ab	37.75b	10205.4a
	6.75	17.8bc	49.1ab	32.4bc	37.70b	10209.0a
	7.87	16.0d	46.7b	28.8d	37.26bc	9828.2bc
	9.00	15.5d	47.5ab	26.9d	35.23cd	10052.1ab
先玉 335 Xianyu 335	4.50	19.9a	53.5a	34.5b	40.54a	10892.3c
	5.60	18.4bc	52.9a	31.8c	40.09ab	11049.6bc
	6.75	17.0d	52.4ab	28.0d	39.76ab	10467.4cd
	7.87	15.5e	51.0bc	24.1e	39.80ab	10365.4d
	9.00	14.8e	51.2bc	22.7e	38.71bc	10206.9d
TR	4.50	20.3a	52.9a	37.2a	39.44abc	11277.8ab
	5.62	19.1ab	52.3ab	34.4b	40.15bc	11519.6a
	6.75	17.6cd	52.0ab	29.7cd	39.88abc	11241.6ab
	7.87	15.6e	51.2bc	24.9e	39.64abc	11042.3b
	9.00	14.8e	50.4c	24.4e	38.32c	10704.2c

注:相同品种同一列数据后不同小写字母分别表示差异达 0.05 显著水平。TR:PGR 处理。

Note: Data followed by lowercase letters in each column are significantly different at the 0.05 probability level. TR:PGR treatment.

## 2.6 不同种植密度下 2 个品种玉米各生理指标与产量性状的相关关系

如表 2 所示,玉米穗位叶保护酶 SOD、POD 和 CAT 活性与产量及产量构成因素的相关关系各异。

其中,POD 活性与产量、穗长呈显著性正相关,CAT 活性与百粒重呈极显著正相关,SOD 活性与产量、产量构成因素相关性不显著;穗位叶 MDA 含量与穗粗、百

粒重和产量程极显著负相关关系;绿素含量与百粒重呈极显著正相关关系。

表 2 玉米穗位叶生理指标与产量性状的相关关系

Table 2 Correlations between senescence physiological index and yield characteristics

指标 index	穗长 ear length (cm)	穗粗 ear diameter (mm)	行粒数 grain number per row	百粒重 100 - kernel weight (g)	产量 yield (kg·hm <sup>-2</sup> )
SOD	0.222	0.075	0.209	0.039	0.355
POD	0.661 *	0.590	0.521	-0.119	0.660 *
CAT	0.384	-0.435	0.515	0.793 **	0.497
MDA	-0.214	-0.915 **	0.012	-0.767 **	-0.810 **
叶绿素 chlorophyll	0.559	-0.427	0.712 *	0.796 **	0.321

注: \*、\*\* 表示相关性达到 0.05 显著和 0.01 极显著水平。

Note: \*, \*\* represent significantly at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

### 3 讨论

#### 3.1 种植密度与叶片衰老的关系

植物的衰老过程受外界环境条件(光、温度、湿度、微生物等)和内部生理代谢(如水分代谢、能量代谢、蛋白质与核酸代谢、内源激素活性等)的同步调控<sup>[18]</sup>,该过程的显著特征是组织内部活性氧的产生速度逐渐加快而清除速度逐渐减慢<sup>[19]</sup>,导致膜质过氧化水平加剧,MDA 迅速产生并大量积累。本研究结果发现,京单 28 和先玉 335 灌浆期穗位叶 MDA 含量均随种植密度的增加呈增加趋势,叶片保绿度随种植密度的增加呈下降趋势,这可能与高密群体内部个体拥挤,冠层光温资源以及根际养分资源竞争,导致生长环境恶化有关。

在叶片衰老过程中,延缓衰老的保护酶系统 SOD、POD 和 CAT 等具有清除生物氧自由基的重要功能,它们协同作用,有效地清除组织内部各种类型的活性氧,降低膜质过氧化水平,保障细胞内生物代谢正常进行<sup>[20]</sup>。本研究结果证明,随种植密度的增加,叶片中 SOD、POD 和 CAT 活性均呈降低趋势,表明增加种植密度导致植株体内代谢不平衡,加速了氧自由基的产生速度,减弱植株清除有害物质的能力。

#### 3.2 化学调控与叶片衰老的关系

已有研究证实,作物化学调控措施通过调节叶片夹角、叶片长度和宽度,调控着群体田间光分布;通过调控根系的分生数量和根系活性,以及根系吸收、同化

养分元素的能力<sup>[21]</sup>。在生理学水平上,本研究发现,磷酸胆碱合剂处理降低了各个种植密度玉米叶片中 MDA 的含量,表现为京单 28 处理较相应对照减少了 4.39% ~ 11.82%,先玉 335 较相应对照减少了 1.40% ~ 6.66%。并且,应用磷酸胆碱合剂处理增加了京单 28 和先玉 335 各种种植密度下叶片的保护酶活性,密度梯度 4.5 ~ 9.0 万株/hm<sup>2</sup> 下,京单 28 的 SOD、CAT 和 POD 活性增幅依次为 5.10% ~ 9.26%、9.43% ~ 15.8% 和 8.84% ~ 19.47%;先玉 335 的 SOD、CAT 和 POD 活性增幅依次为 9.76% ~ 16.76%、2.12% ~ 4.06% 和 4.76% ~ 9.97%。表明化学调控处理通过提高保护酶系统的活性,增强玉米抵御逆境的能力,延缓了叶片衰老的进程。进一步分析发现,磷酸胆碱合剂与种植密度存在着互作效应,保护酶活性在高密度处理下较对照增幅较大,这为大田生产中应用调节剂能够延缓高密度下叶片衰老进程的现状提供了理论依据。

#### 3.3 化学调控与光合生产的关系

作物的生产与叶片光合速率、叶面积大小及光合作用持续时间密切相关<sup>[22]</sup>,而光合速率、有效光合叶面积和光合持续时间决定于叶片叶绿素含量和保绿度<sup>[15,30]</sup>。已有研究表明,高温、缺氮与水分胁迫以及衰老过程,均可导致植物叶绿体超微结构的改变,叶绿素含量降低,最终导致叶片光合速率下降,光合能力降低<sup>[23~26,31]</sup>。在已有的植物生长物质中,水杨酸和赤霉素可以维持水分和温度逆境中玉米叶片内叶绿体超微结构的完整性和稳定性<sup>[27]</sup>,矮壮素具有抑制地上部生长、减少蒸腾,延缓叶片核酸与蛋白质的分解,延迟作

物衰老的作用<sup>[28]</sup>,而叶面喷施 PP333 处理可使小麦叶片的表皮细胞、保卫细胞和叶肉细胞体积显著减少;增加叶片内叶肉细胞的层数和叶脉的机械组织的细胞层数,并可加强叶肉细胞的环型结构,使叶肉细胞之间的排列更加紧密。并且,PP333 处理对小麦叶片内叶绿体超微结构的影响表现为叶绿体内基粒数明显增多,高片层垛叠的基粒数比例增加,类囊体膜系统的发育进程明显加快,显著提高叶片的叶绿素含量,增加叶片的净光合速率,延长叶片的光合功能期<sup>[29]</sup>。本研究表明,化学调控处理后京单 28 和先玉 335 叶片叶绿素含量分别比对照提高了 6.57%~20.89% 和 8.09%~23.40%;京单 28 保绿度较对照增加了 4.5%~13.9%;先玉 335 在低密度下增加了 9.4%~13%,同时产量分别比对照增加 0.41%~4.19% 和 3.54%~7.39%。说明化学调控处理能有效延缓高密度玉米叶片的衰老进程,延长玉米绿叶功能持续期,增强光合能力,增加光合生产能力。

## 4 结论

磷酸胆碱合剂处理延缓了密植条件下玉米叶片的衰老进程,与对照相比,叶绿素含量和保绿度增加,SOD、POD、CAT 活性提高,MDA 含量降低,有效延缓了玉米叶片衰老,显著增加籽粒产量。

## 参考文献:

[1] 王宝忠,潘家荣,郑兴耘,温贤芳. 高产夏玉米的种植密度和肥料效应研究[J]. 核农学报,1998,12(6):353-358

[2] 佟屏亚. 我国玉米高产栽培技术的成就和研究进展[J]. 耕作与栽培,1995,(5):1-5

[3] 刘志全,路立平,沈海波,高明,王志刚. 美国玉米高产竞赛简介[J]. 玉米科学,2004,12(4):110-113

[4] 裴志超. 春玉米密植高产群体茎秆质量的化学调控机理,硕士学位论文,2010,5

[5] 赵会杰,邹琦,郭天财,于振文,董中东,冯春叶. 密度和追肥时期对大穗型小麦 14C2 同化作用及其分配的调控效应[J]. 核农学报,2003,17(1):67-72

[6] 罗瑶年,张建华. 种植密度对玉米叶片衰老的影响[J]. 玉米科学,1994,2(4):22-25

[7] 李春奇,郑慧敏,李芸,李潮海. 种植密度对夏玉米雌穗发育和产量的影响[J]. 中国农业科学,2010,43(12):2435-2442

[8] 顾万荣,葛自强,陈源,陈德华,吴云康. 中国作物化控栽培工程技术研究进展及展望[J]. 农业工程科学,2005,21(7):400-405

[9] 李玲,赵明,李连禄,董志强. 乙矮合剂对玉米产量和茎秆质量的影响[J]. 作物杂志,2007(5):51-54

[10] 丛艳霞,赵明,董志强,孙锐,李玲. 乙霉合剂对春玉米干物质积累和茎秆形态的调控[J]. 作物杂志,2008(4):68-71

[11] 董学会,李建民,何钟佩,段留生,李召虎. 30% 己乙水剂对玉米叶片光合酶活性与同化物分配的影响[J]. 玉米科学,2006,14(4):93-96

[12] 薛金涛,张保明,董志强,赵明,黄长玲. 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

[13] 王小春,杨文钰,陈刚,李乾亮,王星斌. 喷施烯效唑对玉米叶片衰老特性和产量的影响[J]. 玉米科学,2009,17(1):86-88

[14] 郭志强,侯立白,李霞,齐磊,赵明,董志强. 抗低温助长剂对低温胁迫下玉米生长发育及生理生化变化的影响[J]. 玉米科学,2008,28(8):3644-3653

[15] 刘开昌,董树亭,赵海军,王庆成,李宗新,刘霞,张慧. 我国玉米自交系叶片保绿性及其与产量的关系[J]. 作物学报,2009,35(9):1662-1671

[16] 汤章诚. 现代植物生理学实验指南[M]. 北京:科学出版社,1999

[17] 姜东,戴廷波,荆奇,卫星,赵辉,周琴,范雪梅,陈荣振,冯国华,刘东涛,张爱君. 长期定位施肥对小麦旗叶膜脂过氧化作用及 GS 活性的影响[J]. 作物学报,2004,30(12):1232-1236

[18] 杨晓红,陈晓阳,刘克锋. 细胞分裂素对植物衰老的延缓作用[J]. 热带亚热带植物学报,2006,14(3):256-262

[19] 杨淑慎,高俊凤,李学俊. 高等植物叶片的衰老[J]. 西北植物学报,2001,21:1271-1277.

[20] 韩金龙,王同燕,徐子利,徐立华,徐相波,邢燕菊,阴卫军. 玉米抗旱机理及抗旱性鉴定指标研究进展[J]. 中国农学通报,2010,26(21):142-146

[21] 李建民,董学会,何钟佩,胡晓军,段留生,李召虎. 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):78-80,83

[22] 赵明,王树安,李少昆. 论作物产量研究的“三合结构”模式[J]. 北京农业大学学报,1995,21(4):359-363

[23] 魏晓东,陈国祥,徐艳丽,雷华,施大伟. 银杏叶片衰老过程中光合生理特性及叶绿体超微结构的变化[J]. 植物研究,2008,28(4):434-437

[24] 蔡妙珍,罗安程,林咸永,章永松.  $Ca^{2+}$  对过量  $Fe^{2+}$  胁迫下水稻保护酶活性及膜脂过氧化的影响[J]. 作物学报,2003,29(3):447-451

[25] 滕中华,智丽,宗学风,王三根,何光华. 高温胁迫对水稻灌浆结实期叶绿素荧光、抗活性氧活力和稻米品质的影响[J]. 作物学报,2008,34(9):1662-1666

[26] 何萍,金继运,林葆. 氮肥用量对春玉米叶片衰老过程的影响及其机理研究[J]. 中国农业科学,1998,31(3):66-71

[27] 王志斌,葛云侠,王建民,王宏伟,陈凤玉,胡海军,史振声. 水杨酸和赤霉素复配剂对低温下玉米光合特性的影响[J]. 玉米科学,2010,18(6):43-45

[28] 潘瑞炽. 植物生长延缓剂的生理作用及其应用[J]. 华南师范大学学报(自然科学版),1984,(02):121-129

[29] 王兆龙,江海东,严美春,张彪,石火英. PP333 对小麦叶片结构和光合作用的影响[J]. 江苏农业研究,1998,19(4):13-17

[30] 刘克礼,盛晋华. 春玉米叶片叶绿素含量与光合速率的研究[J]. 内蒙古农牧学院学报,1998,19(2):48-51

[31] Fridgen J L, Varco J J. Dependency of cotton leaf nitrogen, chlorophyll, and reflectance on nitrogen and Potassium availability [J]. Agronomy Journal, 2004, 96: 63-69

(责任编辑 邱爱枝)