

# 氮肥不同比例分期施用对超高产玉米叶片 保护酶活性的影响

刘亚亮<sup>1a</sup>, 张治安<sup>1b</sup>, 赵洪祥<sup>2</sup>, 马学敏<sup>1a</sup>

(1 吉林农业大学 a 园艺学院, b 农学院, 吉林 长春 130118; 2 吉林省农业科学院, 吉林 长春 130033)

**【摘要】**【目的】研究不同氮肥施用方式对超高产玉米叶片保护酶活性变化规律的影响,为玉米超高产模式研究提供理论依据。【方法】以超高产玉米品种先玉 335 为试验材料,在氮肥总量一定的条件下,按分配比例不同设 6 个处理:N1.底肥 100%;N2.底肥 80%,拔节期追施 20%;N3.底肥 80%,拔节期追施 10%,吐丝期追施 10%;N4.底肥 60%,拔节期追施 40%;N5.底肥 60%,拔节期追施 30%,吐丝期追施 10%;N6.底肥 60%,拔节期和吐丝期均追施 20%,研究氮肥不同比例分期施用对玉米产量、叶片保护酶(超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT))活性及丙二醛(MDA)、叶绿素(Chl)和可溶性蛋白含量的影响。【结果】N6 处理玉米产量最高,N2 处理玉米产量最低,N6 处理比 N4、N1、N2 处理分别增产 7.3%,10.2%,11.1%。在灌浆期以前,各处理叶片叶绿素及可溶性蛋白含量差异不显著;灌浆期以后,N6、N5 处理叶片叶绿素及可溶性蛋白含量显著高于 N4、N1、N2 处理。在吐丝期以前,各处理叶片保护酶 SOD、POD、CAT 活性及 MDA 含量差异不显著,吐丝期以后 N6、N5 处理的叶片保护酶 SOD、POD、CAT 活性显著高于 N4、N1、N2 处理,而 MDA 含量则显著低于 N4、N1、N2 处理。【结论】氮肥不同比例分期追施使玉米叶片生育后期保护酶活性增强,延缓了玉米叶片的衰老速度,提高了产量。氮肥最佳施用模式为 60%作底肥,拔节期和吐丝期均追施 20%,玉米产量最高可达 14 852.2 kg/hm<sup>2</sup>。

**【关键词】** 超高产玉米;氮肥;保护酶活性;丙二醛(MDA)含量;叶绿素含量

**【中图分类号】** S513.062

**【文献标识码】** A

**【文章编号】** 1671-9387(2011)02-0202-07

## Effect of nitrogen fertilizer application at stages in different proportions on protective enzymes activity in leaves of super high yield maize

LIU Ya-liang<sup>1a</sup>, ZHANG Zhi-an<sup>1b</sup>, ZHAO Hong-xiang<sup>2</sup>, MA Xue-min<sup>1a</sup>

(1 a College of Horticulture and Landscape b College of Agronomy, Jilin Agricultural University, Changchun, Jilin 130118, China; 2 Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

**Abstract:** 【Objective】The effect of nitrogen fertilizer applied in different ways on the change regularity of protective enzymes activity in leaves of super high yield maize was studied to provide a scientific theory for the super-high-yield production model. 【Method】Six treatments were designed in different distribution proportions under the condition of a certain total nitrogen fertilizer using the super high yield maize hybrid Xianyu-335 as the experimental material; N1. Base fertilizer 100%; N2. Base fertilizer 80%, top-dressed in jointing stage 20%; N3. Base fertilizer 80%, top-dressed in jointing stage 10%, top-dressed in an-

\* [收稿日期] 2010-07-12

[基金项目] 科技部“粮食主产区农田生态健康管理关键技术与示范”项目(2006BAD02A15);科技部农业科技成果转化基金项目(2007GB2B10081);国家“十一五”科技支撑计划重点项目(2009BADB3B03);吉林省科技发展计划重点项目(20090221)

[作者简介] 刘亚亮(1983-),男,吉林辽源人,硕士,主要从事植物生理及分子生物学研究。E-mail:liuyaliang2007@163.com

[通信作者] 张治安(1964-),男,吉林长春人,教授,硕士生导师,主要从事植物逆境生理研究。

E-mail:zhangzhian6412@yahoo.com.cn

thesis stage 10%;N4. Base fertilizer 60%,topdressed in jointing stage 40%;N5. Base fertilizer 60%,topdressed in jointing stage 30%,topdressed in anthesis stage 10%;N6. Base fertilizer 60%,topdressed in both jointing stage and anthesis stage with 20%. The effects of nitrogen fertilizer application at stages in different proportions on the outcome of maize,the protective enzyme activity(speroxide dismutase(SOD),proxi-dase(POD),ctalase(CAT)),the content of malondialdehyde(MDA),the content of chlorophyll(Chl) and soluble protein in leaves were studied.【Result】The results showed that the yield of N6 treatment was the highest,the yield of N2 treatment was the lowest,and N6 treatment increased production by 7.3%,10.2% and 11.1% than N4,N1 and N2 treatment respectively. The difference of Chl content and soluble protein in leaves of all different treatments were not significant before filling stage. After that,the content of Chl and soluble protein of N6 and N5 in leaves were significantly higher than that of N4,N1 and N2. The protective enzyme activity and MDA content of each treatment were not significant before anthesis stage,but protective enzyme activities of N6 and N5 were significantly higher than that of N4,N1 and N2 after filling stage,and the MDA content was significantly lower than that of N4,N1 and N2 treatment.【Conclusion】The study showed that nitrogen fertilizer application at stages in different proportions can reinforce protective enzyme activity and slow down the aging of leaves in late growth stage,thereby enhancing the yield. The best nitrogen application model is the base fertilizer applied by 60%,both the jointing stage and anthesis stage should be topdressed by 20%. The highest yield of maize can be up to 14 852.2 kg/hm<sup>2</sup>.

**Key words:** super high yield maize; nitrogen fertilizer; protective enzymes activity; MDA content; Chl content

在农作物生产中,叶片早衰是影响其产量的重要因素之一。植物的保护酶系统能够有效地清除膜脂过氧化作用产生的有害物质,对延缓植物衰老、增强植物抗逆性,从而维持植物的正常新陈代谢和生长发育起着关键性作用。超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)活性及丙二醛(MDA)含量与衰老密切相关,一般将 SOD、POD 活性及 MDA 含量作为植物衰老的指标<sup>[1-2]</sup>。相关研究表明,植物叶片在衰老过程中,叶绿素的降解明显快于合成,叶片蛋白质迅速丧失、RNA 大量水解,在形态上表现为黄化现象,这些变化是植物叶片衰老过程中的典型特征<sup>[3-5]</sup>。目前,有关农作物衰老的问题,国内外科人员已经进行了大量的研究。王空军等<sup>[6]</sup>研究表明,玉米新品种清除活性氧的能力增强,开花后叶片 SOD 和 POD 等活性提高,膜脂过氧化产物 MDA 含量减少,衰老延缓,有利于产量提高。黄智鸿等<sup>[7]</sup>研究也表明,超高产玉米品种先玉 335 和郑单 958 的保护酶活性显著高于对照品种,具有较强的超高产生理基础。岳寿松等<sup>[8]</sup>研究了不同生育时期施氮对冬小麦旗叶衰老和粒质量的影响,发现在四分体形成期和雌、雄蕊原基形成期施氮,提高了旗叶衰老初期可溶性蛋白含量和衰老后期的光合速率,显著提高了粒质量和籽粒产量。战秀梅等<sup>[9]</sup>对不同施肥处理下玉米生育后期叶片保护酶活性进行了研究,发

现 N、P、K 缺乏或过量均会使叶片膜脂过氧化加剧,较早进入早衰状态。可见,通过品种改良和调整施肥方式可以实现高产的目的,但新品种的推出需要较长的周期,而在现有高产品种的基础上采用合理的施肥模式也是提高产量最行之有效的途径,但这方面的研究还较少。本试验以超高产玉米品种先玉 335 为研究对象,在不同生育时期进行氮肥调控,对超高产模式下保护酶活性、MDA 含量、叶绿素及可溶性蛋白含量的变化规律进行系统研究,旨在为玉米超高产模式研究提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料及试验基地生态地理条件

1.1.1 供试品种 超高产玉米品种先玉 335,由先锋公司提供。

1.1.2 试验基地的生态地理条件 本试验在吉林省东部半山区的桦甸市金沙乡吉林省农业科学院基地(126°76'E、42°9'N)进行,该地区是吉林省东部地区比较有代表性的冲积土,地势平坦,肥力均匀。常年日照 2 500~2 700 h,降水 600~650 mm,5~9 月积温 2 700~2 800 °C·d,属湿润冷凉型气候;供试土壤基础肥力为:全 N 0.77 g/kg,全 P 1.99 g/kg,有机质 11.433 g/kg,速效 N 102.49 mg/kg,速效 P 102.53 mg/kg,速效 K 151.89 mg/kg,pH 6.7。

## 1.2 试验设计

于 2009-05-07 播种, 设置密度为 8.5 万株/hm<sup>2</sup>, 2009-10-10 收获测产, 并考种。化肥施用总量为纯 N 370 kg/hm<sup>2</sup>、纯 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 150 kg/hm<sup>2</sup>、纯 K<sub>2</sub>O 150 kg/hm<sup>2</sup>, 磷、钾肥作为底肥一次性施入, 氮肥分别在播前作为底肥, 拔节期、吐丝期作为追肥施入, 按其施入比例不同, 共设 6 个处理(表 1), 每处理 3 次重复, 小区行长 10 m, 行距 0.6 m, 12 行区, 小区面积 72 m<sup>2</sup>。

表 1 玉米各生育时期氮肥的分配比例

Table 1 Allocation proportion of nitrogen fertilizer at different growth stages %

处理 Treatment	底肥 Base fertilizer	拔节期追肥 Topdressing in jointing stage	吐丝期追肥 Topdressing in anthesis stage
N1(CK)	100	0	0
N2	80	20	0
N3	80	10	10
N4	60	40	0
N5	60	30	10
N6	60	20	20

## 1.3 测定方法

分别于苗期(06-04)、拔节期(06-24)、大喇叭口期(07-08)、孕穗期(07-18)、吐丝期(08-05)、灌浆期(08-24)、乳熟期(09-05)、蜡熟期(09-21)8 个时期取样, 孕穗期以前取植株顶端第一片全展叶, 从孕穗期开始取穗位叶。超氧化物歧化酶(SOD)活性用氮蓝四唑(NBT)光化学还原法测定<sup>[10]</sup>, 以抑制 NBT 光氧化还原 50% 的酶量为 1 个酶活力单位, 用“U/g”

表示; 过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法测定<sup>[10]</sup>, 测定 470 nm 处吸光度(A<sub>470</sub>)的变化, 以 1 min 内 A<sub>470</sub>变化 0.1 为 1 个过氧化物酶活性单位, 以“U/g”表示; 过氧化氢酶(CAT)活性采用紫外吸收法测定<sup>[10]</sup>, 测定 240 nm 处吸光度(A<sub>240</sub>)的变化, 以 1 min 内减少 0.1 个 A<sub>240</sub> 值所需的酶量为 1 个酶活力单位, 用“U/g”表示; 丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸(TBA)显色法测定<sup>[10]</sup>, 单位以“μmol/g”表示; 可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝法测定<sup>[10]</sup>; 叶绿素含量采用分光光度法测定<sup>[10]</sup>。测定指标均采用鲜样(FW), 所有数据均为 3 次测定结果的平均值。

## 2 结果与分析

### 2.1 氮肥不同比例分期施用条件下超高产玉米产量的比较

从表 2 可以看出, 各处理玉米的产量由高到低依次是 N6 > N5 > N3 > N4 > N1 > N2。N6 处理的产量和百粒质量均最高, N2 处理的产量和百粒质量均最低; N6 处理比 N4、N1、N2 处理分别增产 7.3%, 10.2%, 11.1%, 百粒质量分别增加 20.0%, 21.3%, 24.5%; N5 处理比 N1、N2 处理分别增产 5.9%, 6.7%, 百粒质量分别增加 8.2%, 11.0%; N6、N5 处理的产量和百粒质量均显著或极显著高于 N4、N1、N2 处理; N1 与 N2 处理的产量和百粒质量差异不显著。

表 2 氮肥不同比例分期施用对超高产玉米产量及产量构成因素的影响

Table 2 Effect of nitrogen fertilizer application at stages in different proportions on yield and composition of super high yield maize

处理 Treatment	产量/(kg·hm <sup>-2</sup> ) Yield	穗行数 Rows	行粒数 Kernels	百粒质量/g 100-kernels weight
N1(CK)	13 471.6 ± 84.5 DEd	16.0 ± 0.5 Aa	30.6 ± 1.5 Aa	33.9 ± 1.6 Dc
N2	13 370.5 ± 82.9 Ed	16.1 ± 0.8 Aa	30.5 ± 2.8 Aa	33.0 ± 1.1 Dc
N3	13 951.8 ± 89.2 BCc	16.3 ± 0.3 Aa	30.7 ± 1.3 Aa	35.7 ± 1.4 Bbc
N4	13 844.7 ± 79.8 CDc	16.2 ± 0.7 Aa	30.4 ± 0.9 Aa	34.3 ± 1.4 CDc
N5	14 265.7 ± 93.7 Bb	16.6 ± 0.7 Aa	30.9 ± 1.3 Aa	36.7 ± 1.5 Bb
N6	14 852.2 ± 107.3 Aa	16.5 ± 0.5 Aa	31.4 ± 1.1 Aa	41.1 ± 1.0 Aa

注: 同列数据后标不同大、小字母者分别表示在 0.01 和 0.05 水平上差异显著。

Note: Capital and small letters after data in the same column mean significant difference at 0.01 and 0.05 levels.

### 2.2 氮肥不同比例分期施用条件下超高产玉米叶片叶绿素含量的变化

从图 1 可以看出, 在全生育期内, 玉米叶片叶绿素含量呈单峰曲线变化。苗期到大喇叭口期上升较快, 之后缓慢上升, 到灌浆期达到最大值, 以后逐渐下降。比较各处理可知, 在灌浆期以前, 各处理叶片

叶绿素含量无显著差异, 灌浆期以后逐渐出现差异, 到蜡熟期, 各处理的叶绿素含量表现为 N6 > N5 > N3 > N4 > N1 ≈ N2, N6 处理的叶绿素含量最高, 分别是 N1、N2、N3、N4、N5 处理的 1.4, 1.4, 1.15, 1.27, 1.06 倍。

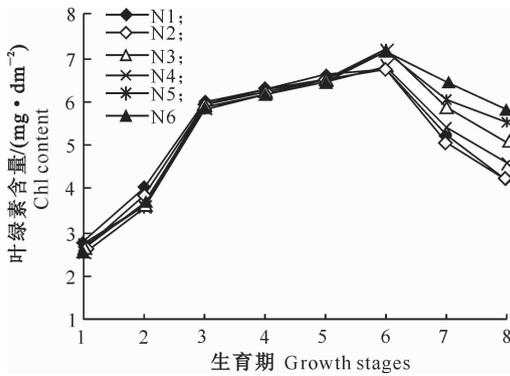


图 1 氮肥不同比例分期施用对超高产玉米叶片叶绿素含量的影响

1. 苗期;2. 拔节期;3. 大喇叭口期;4. 孕穗期;5. 吐丝期;6. 灌浆期;7. 乳熟期;8. 蜡熟期。下图同

Fig. 1 Effect of nitrogen fertilizer application at stages in different proportions on Chl content in leaves of super high yield maize

1. Seedling stage;2. Jointing stage;3. Trumpet stage;4. Booting stage;5. Anthesis stage;6. Filling stage;7. Milking stage;8. Ripening stage. The following figure is same

### 2.3 氮肥不同比例分期施用条件下超高产玉米叶片可溶性蛋白含量的变化

从图 2 可以看出,在全生育期内,玉米叶片可溶性蛋白含量呈单峰曲线变化,在灌浆期达到最大值,以后逐渐下降,这与叶绿素含量的变化规律基本一致。从各处理的变化情况看,灌浆期以前,各处理叶片可溶性蛋白含量差异并不显著,灌浆期以后,N4、N1、N2 处理叶片的可溶性蛋白含量下降速率显著高于 N6、N5、N3 处理。到蜡熟期,N6 处理叶片可溶性蛋白含量分别是 N4、N2、N1 处理的 1.30,1.51,1.58 倍;N5 的可溶性蛋白含量分别是 N4、N2、N1 处理的 1.25,1.45,1.51 倍;N3 处理的可溶性蛋白含量分别

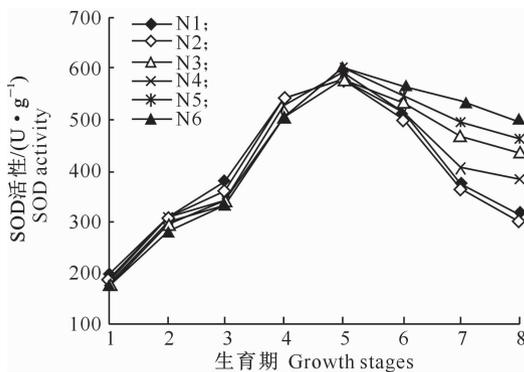


图 3 氮肥不同比例分期施用对超高产玉米叶片 SOD 活性的影响

Fig. 3 Effect of nitrogen fertilizer application at stages in different proportions on SOD activity in leaves of super high yield maize

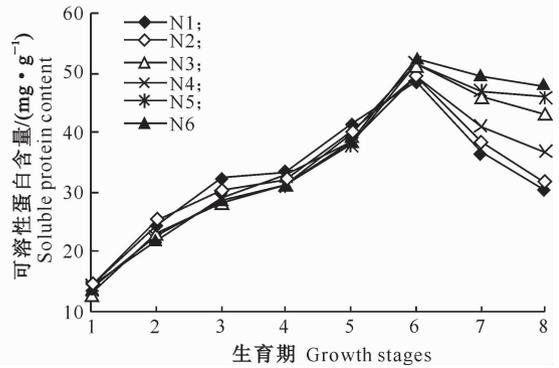


图 2 氮肥不同比例分期施用对超高产玉米叶片可溶性蛋白含量的影响

Fig. 2 Effect of nitrogen fertilizer application at stages in different proportions on soluble protein content in leaves of super high yield maize

是 N4、N2、N1 处理的 1.17,1.35,1.41 倍。

### 2.4 氮肥不同比例分期施用条件下超高产玉米叶片 SOD 活性的变化

图 3 表明,在全生育期内,玉米叶片 SOD 活性呈单峰曲线变化,在吐丝期达到最大值,以后开始逐渐下降。各处理比较结果表明,吐丝期以前,各处理叶片 SOD 活性差异并不显著,吐丝期以后,N6、N5、N3 处理叶片 SOD 活性显著高于 N4、N2、N1 处理。到蜡熟期,N1、N2、N3、N4、N5、N6 处理叶片 SOD 活性分别比灌浆期下降 45.78%,47.52%,24.80%,35.09%,23.12%,17.32%,可见,N6、N5、N3 处理玉米叶片 SOD 活性下降速率显著低于 N4、N1、N2 处理。

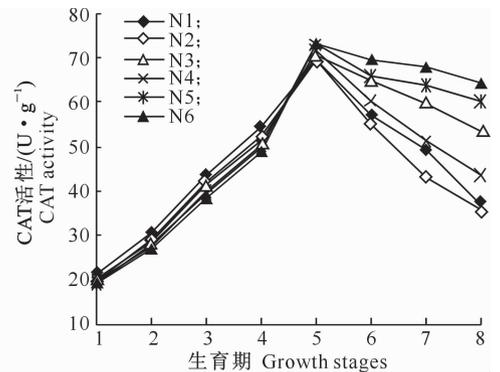


图 4 氮肥不同比例分期施用对超高产玉米叶片 CAT 活性的影响

Fig. 4 Effect of nitrogen fertilizer application at stages in different proportions on CAT activity in leaves of super high yield maize

## 2.5 氮肥不同比例分期施用条件下超高产玉米叶片 CAT 活性的变化

图 4 表明,在全生育期内,玉米叶片 CAT 活性呈单峰曲线变化,在吐丝期达到最大值,以后开始逐渐下降。各处理比较结果表明,吐丝期以前,各处理玉米叶片 CAT 活性差异并不显著,吐丝期以后,各处理叶片 CAT 活性变化类似于 SOD;到蜡熟期,N1、N2、N3、N4、N5、N6 处理叶片 CAT 活性分别比灌浆期下降 46.58%,48.14%,24.73%,38.73%,17.50%,11.57%,可见,N6、N5、N3 处理叶片 CAT 活性下降速率显著低于 N4、N2、N1 处理。

## 2.6 氮肥不同比例分期施用条件下超高产玉米叶片 POD 活性的变化

图 5 表明,在全生育期内,玉米叶片 POD 活性呈单峰曲线变化,在吐丝期达到最大值,之后开始逐渐下降。各处理比较结果表明,吐丝期以前,各处理 POD 活性差异并不显著,吐丝期以后,N6、N5、N3 处理叶片 POD 活性显著高于 N4、N2、N1 处理;到蜡熟

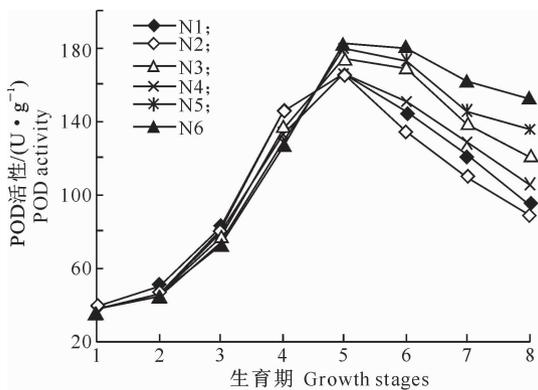


图 5 氮肥不同比例分期施用对超高产玉米叶片 POD 活性的影响

Fig. 5 Effect of nitrogen fertilizer application at stages in different proportions on POD activity in leaves of super high yield maize

## 3 讨论

据报道,合理施肥在玉米增产诸因素中起 28%~30% 的作用。玉米对氮肥的需求量很高,一般在生产中氮肥主要以追肥方式施入。前人研究表明,玉米全生育期对氮的积累速度呈双峰曲线<sup>[11-12]</sup>,第 1 峰出现在拔节期一大喇叭口期,第 2 峰出现在灌浆期一成熟期。相关研究指出,在吉林省西部半干旱地区,一次性施肥受年际降雨量影响较大,而农民所采用的“一炮轰”施肥方式由于基肥施用量过高,造成氮肥表观利用率降低,这 2 种施肥方式均可

期,N1、N2、N3、N4、N5、N6 处理叶片 POD 活性分别比灌浆期下降 43.27%,46.91%,30.99%,36.62%,24.53%,16.89%,可见,N6、N5、N3 处理叶片 POD 活性下降速率显著低于 N4、N2、N1 处理。

## 2.7 氮肥不同比例分期施用条件下超高产玉米叶片 MDA 含量的变化

由图 6 可以看出,玉米叶片 MDA 含量在全生育期内都处于上升的状态,在吐丝期以前,各处理叶片 MDA 含量表现出缓慢的上升趋势,且差异不显著;吐丝期以后,MDA 含量变化表现出与保护酶活性变化相反的趋势,上升较为剧烈,且各处理叶片 MDA 含量差异达到显著或极显著水平;到蜡熟期,各处理叶片 MDA 含量表现为 N6 < N5 < N3 < N4 < N1 < N2, N1、N2、N3、N4、N5、N6 处理叶片 MDA 含量分别比灌浆期升高 82.45%,99.44%,69.05%,69.72%,54.27%,39.44%。可见,N4、N1、N2 处理叶片 MDA 含量上升速率显著高于 N6、N5、N3 处理。

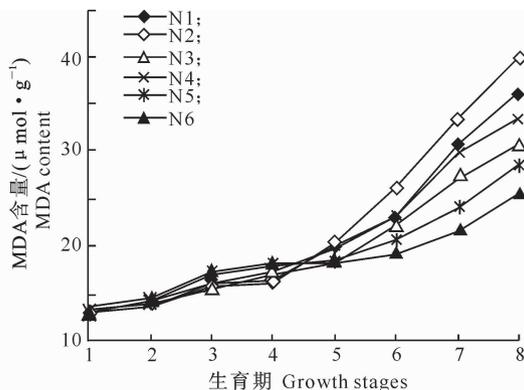


图 6 氮肥不同比例分期施用处理对超高产玉米叶片 MDA 含量的影响

Fig. 6 Effect of nitrogen fertilizer application at stages in different proportions on MDA content in leaves of super high yield maize

导致土壤中无机氮高残留,使氮素损失增加,对该地区的生态环境造成一定威胁<sup>[13]</sup>。本试验打破了农民常规施肥方式,对氮肥基肥与追肥分配比例进行了调整,适当增加拔节期和吐丝期氮肥分配比例,结果表明,分期施用不同比例氮肥具有明显的增产潜力,这可能是由于拔节期和吐丝期进行氮肥补给,提高了氮素的转运及利用效率,进而达到了增产的效果。

叶绿素和可溶性蛋白是反映作物生长发育动态特征的 2 个重要指标。Leshem<sup>[14]</sup> 研究指出,叶片衰老最明显的表现就是叶绿素逐渐消失,并伴随着黄

化以及叶片的最终脱落。而增施氮肥,能显著提高玉米产量和叶片叶绿素含量。郑强等<sup>[15]</sup>研究表明,在总施肥量一定的情况下,后期施肥量的增加有利于玉米后期叶片叶绿素含量的增大。蛋白质降解是叶片衰老的基本特征<sup>[16]</sup>,同时蛋白质丧失也是叶片衰老的早期表现,与叶绿素和 RNA 相比,蛋白质的丧失要早<sup>[17]</sup>。Shibaoka 等<sup>[18]</sup>根据上述现象提出,在叶片衰老过程中,应将蛋白质水解看成是主要反应,因此抑制蛋白质水解,将有可能抑制叶片衰老。氮肥调控对叶片蛋白质含量的影响十分明显,有关氮肥调控春小麦的研究发现,氮肥施用适当后移能延长可溶性蛋白含量缓降期<sup>[19]</sup>。可见氮肥的调控模式对于提高玉米叶片叶绿素含量、延缓叶片可溶性蛋白降解具有重要作用。

本试验结果表明,灌浆期之前,各处理叶片叶绿素及可溶性蛋白含量差异并不显著;灌浆期之后,N6、N5、N3 处理叶片叶绿素及可溶性蛋白含量显著高于 N4、N1、N2 处理,下降速率则显著低于 N4、N1、N2 处理。说明,吐丝期追施氮肥,可以满足灌浆期以后的第 2 个需氮高峰,尤其有利于生育后期叶片的维绿性,延缓叶片衰老,增加籽粒的干物质积累量,提高千粒质量和产量。这与王启现等<sup>[20]</sup>的研究结果基本一致。

MDA 是膜脂过氧化作用的终产物之一,对植物的亚细胞结构具有极端的破坏作用。陈少裕<sup>[21]</sup>曾系统地报道了 MDA 对植物体内生物大分子结构和功能的破坏作用,其中包括对叶绿体、线粒体以及相关蛋白质的极端破坏作用。本试验结果表明,在超高产玉米生育后期(吐丝期—蜡熟期),保护酶 SOD、CAT 和 POD 活性与 MDA 含量变化趋势恰好相反,这表明保护酶系统与清除植物体内过氧化物的相关功能密切相关。作为植物抗氧化系统的第一道防线,SOD 能够防止超氧自由基对生物膜系统的氧化,对细胞的抗氧化、衰老具有重要的意义,其歧化  $O_2^-$  为  $H_2O_2$  和  $O_2$ ,影响着植物中  $O_2^-$  和  $H_2O_2$  的浓度,从而可能在保护系统中处于核心地位<sup>[22]</sup>;而 POD 和 CAT 也是普遍存在于植物体内的清除  $H_2O_2$  的重要酶类,与 SOD 一起构成植物保护酶系统。

从本试验结果来看,在吐丝期之前,各处理叶片保护酶活性差异并不显著;吐丝期之后,N6、N5、N3 处理叶片保护酶活性显著高于 N4、N1、N2 处理,保护酶活性下降速率显著低于 N4、N1、N2 处理,而 N4、N1、N2 处理叶片 MDA 含量和上升速率则显著

高于 N6、N5、N3 处理。说明吐丝期追施氮肥,可以满足灌浆期以后的第 2 个需氮高峰,尤其有利于生育后期保护酶体系维持在较为稳定的状态,这可能是由于此时期追加氮肥能为保护酶的合成提供充足的氮源,从而增强了植株清除活性氧的机能,进而延长叶片功能期,提高籽粒产量。

总之,当氮肥总量一定(适合当地的施肥量)时,适当调整玉米不同生育期的氮肥施用比例,对于超高产模式具有巨大贡献。在东北地区,建议最佳超高产施氮模式为:60%氮肥作底肥,拔节期和吐丝期分别追施 20%氮肥,此处理下玉米产量最高可达 14 852.2 kg/hm<sup>2</sup>。

## [参考文献]

- [1] 张治安,陈展宇.植物生理学[M].长春:吉林大学出版社,2009:327-329.  
Zhang Z A,Chen Z Y. Plant physiology [M]. Changchun:Jilin University Press,2009:327-329. (in Chinese)
- [2] 鲁剑巍,陈 防,刘冬碧.钾素水平对油菜酶活性的影响[J].中国油料作物学报,2002,24(3):61-66.  
Lu J W,Chen F,Liu D B. Effect of potash application on some enzyme content in rapeseed leaf [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences,2002,24(3):61-66. (in Chinese)
- [3] Matile P,Düggelin T,Schellenberg M,et al. How and why is chlorophyll broken down in senescent leaves [J]. Plant Physiol Biochem,1989,27:595-604.
- [4] Stefan Hörtensteiner,Urs Feller. Nitrogen mobilization remobilization during senescence [J]. Journal of Experimental Botany,2002,53:927-937.
- [5] Grabam I A,Leaver C J,Smith S M. Induction of malate synthase gene expression in senescent and detached organs of cucumber [J]. Plant Cell,1992,4:349-357.
- [6] 王空军,胡昌浩,董树亭,等.我国不同年代玉米品种开花后叶片保护酶活性及膜脂过氧化作用的演进[J].作物学报,1999,25(6):700-706.  
Wang K J,Hu C H,Dong S T,et al. Changes of the protective enzyme activities and lipid peroxidation after anthesis among maize varieties planted in different years [J]. Acta Agronomica Sinica,1999,25(6):700-706. (in Chinese)
- [7] 黄智鸿,李秀娟,梁焯赫,等.超高产玉米品种叶片保护酶活性及膜脂过氧化作用研究[J].江苏农业科学,2008(2):29-32.  
Huang Z H,Li X J,Liang X H,et al. The study of the protective enzyme activities and lipid peroxidation in leaves of super high yield maize [J]. Jiangsu Agricultural Science,2008(2):29-32. (in Chinese)
- [8] 岳寿松,于振文,余松烈,等.不同生育时期施氮对冬小麦旗叶衰老和粒重的影响[J].中国农业科学,1997,30(2):42-46.  
Yue S S,Yu Z W,Yu S L,et al. Effects of nitrogen application at different growth stages on the senescence of flag leaves and grain yield in winter wheat [J]. Scientia Agricultura Sinica,

- 1997,30(2):42-46. (in Chinese)
- [9] 战秀梅,韩晓日,杨劲峰.不同施肥处理对玉米生育后期叶片保护酶活性及膜脂过氧化作用的影响[J].玉米科学,2007,15(1):123-127.  
Zhan X M, Han X R, Yang J F. Effect of different nitrogen fertilizer application for maize on protective enzyme activities and lipid peroxidation in leaves at latter stages [J]. Journal of Maize Sciences, 2007, 15(1): 123-127. (in Chinese)
- [10] 张治安,陈展宇.植物生理学实验技术[M].长春:吉林人民出版社,2008.  
Zhang Z A, Chen Z Y. The guidance of plant physiology experiment [M]. Changchun: Jilin University Press, 2008. (in Chinese)
- [11] 王庆成,张军,牛玉贞,等.高产夏玉米养分吸收分配规律的研究[J].土壤肥料,1993(3):23-26.  
Wang Q C, Zhang J, Niu Y Z, et al. Study on nutrient uptaking and distribution of high-yielding summer maize [J]. Journal of Soil Fertilizer, 1993(3): 23-26. (in Chinese)
- [12] 娄方德.紧凑型玉米掖单 13 对氮磷钾元素的吸收规律[J].贵州农业科学,1999,27(4):12-15.  
Lou F D. The absorption law of compact corn yedan-13 of N, P and K [J]. Guizhou Agricultural Science, 1999, 27(4): 12-15. (in Chinese)
- [13] 高强,蔡红光,黄立华,等.吉林省半干旱地区春玉米连作体系氮素平衡研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2009,37(8):128-132.  
Gao Q, Cai H G, Huang L H, et al. Study on soil nitrogen balance of spring maize continuous cropping in semi-arid area of Jilin Province [J]. Journal of Northwest A&F University: Nat Sci Ed, 2009, 37(8): 128-132. (in Chinese)
- [14] Leshem Y Y. Oxygen free radicals and plant senescence [J]. Wheat's New in Plant Physiol, 1981(12): 1-4.
- [15] 郑强,王志敏,蔡永旺,等.夏玉米叶片叶绿素含量的时空动态及其与植株含氮率关系的研究[J].玉米科学,2008,16(6):75-78.  
Zheng Q, Wang Z M, Cai Y W, et al. Study on spatial-tempo-  
ral distribution of chlorophyll content and its correlation to plant N content in summer maize [J]. Journal of Maize Sciences, 2008, 16(6): 75-78. (in Chinese)
- [16] 吴光南,刘宝仁,张金渝.水稻叶片蛋白水解酶的某些理化特性及其与衰老的关系[J].江苏农业学报,1985,1(1):128.  
Wu G N, Liu B R, Zhang J Y. Proteases in rice leaves some chemical and physical properties and activities in relation to senescence [J]. Journal of Jiangsu Agriculture, 1985, 1(1): 128. (in Chinese)
- [17] 陆定志,潘裕才,马跃芳,等.杂交水稻抽穗结实期间叶片衰老的生理生化研究[J].中国农业科学,1988,21(3):21-26.  
Lu D Z, Pan Y C, Ma Y F, et al. Physiological and biochemical studies on leaf senescence at heading grain formation stage in hybrid rice [J]. Scientia Agricultural Sinica, 1988, 21(3): 21-26. (in Chinese)
- [18] Shibaoka H, Thimann K V. Antagonisms between kinetin and amino acids; Experiments on the mode of action of cytokinins [J]. Plant Physiol, 1970, 46: 212-220.
- [19] 郭改玲.春小麦衰老特性与氮肥调控的研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2006.  
Guo G L. Study on senescence and regulation with nitrogen in spring wheat [D]. Huhhot: Mongolia Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- [20] 王启现,王璞,王伟东,等.吐丝期施氮对夏玉米粒重和籽粒粗蛋白的影响[J].中国农业大学学报,2002,7(1):59-64.  
Wang Q X, Wang P, Wang W D, et al. Effect of additional N supplied at silking on 1 000-grain weight and grain crude protein content of summer corn [J]. Journal of China Agricultural University, 2002, 7(1): 59-64. (in Chinese)
- [21] 陈少裕.膜脂过氧化对植物细胞的伤害[J].植物生理学通讯,1991,27(2):84-90.  
Chen S Y. Injury of membrane lipid peroxidation to plant cell [J]. Plant Physiology Communication, 1991, 27(2): 84-90. (in Chinese)
- [22] Bowler C, Montagu M V, Inzé D. Superoxide dismutase and stress tolerance [J]. Annu Rev Plant Physiol, 1992, 43: 83-116.