

DOI: 10.5846/stxb202007111801

闫东良,何灵芝,李欢,马梦金,王泳超,邵瑞鑫,杨青华,郭家萌.控释尿素和普通尿素配比对不同氮效率玉米叶片衰老特性和土壤酶活性的影响.生态学报,2021,41(23):9410-9421.

Yan D L, He L Z, Li H, Ma M J, Wang Y C, Shao R X, Yang Q H, Guo J M. Effects of combination of controlled release urea and normal urea on the leaf senescence and soil enzyme activity of different maize cultivars. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(23): 9410-9421.

## 控释尿素和普通尿素配比对不同氮效率玉米叶片衰老特性和土壤酶活性的影响

闫东良,何灵芝,李欢,马梦金,王泳超,邵瑞鑫,杨青华,郭家萌\*

河南农业大学农学院,郑州 450046

**摘要:**控释尿素和普通尿素配比施用可以同步玉米氮素需求,延缓后期衰老,增加产量。本试验以黄淮海区域两种氮效率玉米作为对象,研究控释尿素和普通尿素不同配比对其叶片衰老特性、土壤酶活性和土壤无机氮的影响。试验选取黄淮海主栽玉米品种豫禾 988(氮低效)和郑单 958(氮高效)作为试验材料,设置 6 个施氮处理(CK、N180U、N180C1、N180C2、N180C、N300U),其中 CK 为不施氮处理,180、300 代表施氮水平分别为 180 kg/hm<sup>2</sup> 和 300 kg/hm<sup>2</sup>,U 代表全尿素处理(基肥:追肥=2:3),C1、C2 分别代表控释氮:尿素氮为 1:2 和 2:1(基肥一次施用),C 代表全控释尿素处理(基肥一次施用)。2018—2019 年结果表明:与 CK 相比,豫禾 988 在 N180C1 和郑单 958 在 N180C2 处理下,能够在玉米生育后期显著提高穗位叶超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)活性,降低膜脂过氧化物(MDA)含量,同时也增加了土壤无机氮含量、脲酶和蔗糖酶活性。综上所述,针对不同氮效率玉米品种,通过控释尿素和尿素合理配施,利用速效氮和控释氮的释放来延缓玉米功能叶片衰老,延长功能期,提高生育后期土壤无机氮含量和酶活性,共同促进玉米生长,增加玉米产量,其中豫禾 988 和郑单 958 分别在 N180C1 和 N180C2 处理下效果最佳。

**关键词:**控释尿素和尿素配比;玉米品种;衰老酶特性;土壤酶活性

## Effects of combination of controlled release urea and normal urea on the leaf senescence and soil enzyme activity of different maize cultivars

YAN Dongliang, HE Lingzhi, LI Huan, MA Mengjin, WANG Yongchao, SHAO Ruixin, YANG Qinghua, GUO Jiameng\*

College of Agriculture, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China

**Abstract:** Mixture of controlled release urea and urea one-application can synchronize the need of nitrogen requirement, postpone leaf senescence and increase yield for summer maize, coupling with labor saving, which will be the most effective way of nitrogen application in the future. In our experiment, two maize cultivars of different nitrogen efficiency were selected to study the effects of different ratios of controlled-release urea and urea on leaf senescence characteristics, soil inorganic nitrogen content, enzyme activity and yield of different maize varieties. Using cultivars YH988 and ZD958, which were mainly planted cultivars in Huang Huaihai Plain as test materials, 6 treatments (CK, N180U, N180C1, N180C2, N180C, and N300U) were set up, of which CK was no nitrogen treatment, 180 and 300 represented nitrogen application levels of 180 kg/hm<sup>2</sup> and 300 kg/hm<sup>2</sup>, respectively. U stands for total urea treatment (basal nitrogen and top dressing was 2:3), C1 and C2 stand for the controlled release urea : ordinary urea being 1:2 and 2:1 (basal nitrogen one-application), and C

基金项目:国家重点研发计划(2018YFD0300704);国家重点研发计划(2018YFD0200601)

收稿日期:2020-07-11; 网络出版日期:2021-07-26

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: guojiameng@hotmail.com

stands for full controlled release urea treatment (basal nitrogen one-application). The results during 2018 and 2019 showed that one-off application of the blend of controlled release urea (CRU) and urea (U) before sowing at  $180 \text{ kg N hm}^{-2}$  was able to satisfy the N demand of a summer maize system with varieties YH988 and ZD958 in Huang Huaihai Plain. One-off application a mixture of CRU and urea with 1:2 and 2:1 of cultivars YH988 and ZD958 at  $180 \text{ kg N hm}^{-2}$  achieved the highest yield, which indicated N180C1 and N180C2, respectively. During the maize growth period, comparing with CK treatment, the superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD) activities of ear leaves increased significantly and the membrane lipid peroxides (MDA) content of ear leaves reduced significantly in treatment N180C1 and N180C2 for cultivars YH988 and ZD958, respectively, while also increasing soil inorganic nitrogen content, urease and sucrose enzyme activity in the post-silking stage for summer maize. In summary, for the two maize cultivars with different nitrogen efficiencies, optimizing the mixture of controlled-release urea and urea can delay the senescence of functional leaves of maize through the complementary effects of the release of urea in the early stage and the release of CRU in the later stage, prolong the functional period, and increase the soil inorganic nitrogen content and enzyme activity in the later growth period. The treatments N180C1 and N180C2 are most suitable for YH988 and ZD958, respectively.

**Key Words:** mixture of controlled release nitrogen and urea; maize cultivar; senescence enzyme activity; soil enzyme activity

玉米是重要的粮饲作物,对我国粮食安全生产及畜牧业的发展起着至关重要的作用<sup>[1]</sup>。氮素是玉米生长过程中所必需的而且需求量最大的矿物元素,其中土壤无机氮是判断土壤供氮能力的重要指标,因此合理施用氮肥是提高土壤肥力使作物获得高产的有效措施之一<sup>[2-3]</sup>。研究发现<sup>[4]</sup>玉米生育期对氮素的吸收规律是前期缓慢增长,拔节后快速上升,吐丝至成熟期增幅较小,因此合理匹配其氮素需求是实现玉米高产的关键。树脂包膜尿素(CRU)具有缓慢释放养分的特性,能够满足各生育期玉米对养分的需求,从而提高氮肥利用率、降低环境风险<sup>[5-6]</sup>。控释尿素与尿素掺混一次性施用,既可以满足玉米生长及对氮素的需求,又可以减少追肥投入,以应对当前集约化农业生产劳动力不足以及轻简化的趋势。

玉米花后籽粒形成和叶片衰老同时进行,延长绿叶持续期进而延长籽粒有效灌浆时间是获得高产的基础<sup>[7-8]</sup>。土壤氮素供应不足或者过量都会造成超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)活性的降低,引起活性氧累积,导致膜脂过氧化产物(MDA)增加,光合能力下降,从而加速叶片衰老,不利于籽粒灌浆,最终导致作物产量下降<sup>[9-10]</sup>。适量施氮能增强玉米生育后期叶片保护酶活性,延缓叶片衰老<sup>[11-12]</sup>。土壤酶是土壤生态系统中最活跃的组分,在营养物质转化、有机质分解等方面起着非常重要的作用<sup>[13-15]</sup>,其活性反映了土壤中各种生物化学过程的强度和方向,是土壤质量和生态系统健康的重要指标,常用土壤蔗糖酶和脲酶活性作为土壤肥力水平评价的重要依据。武鹏<sup>[16]</sup>等研究发现,缓释/普通尿素配施可以提高玉米生育后期 10—30 cm 土层无机氮含量和脲酶活性。

不同基因型玉米品种对氮肥的转化吸收与利用等方面存在显著差异,这种差异主要来自于吐丝后氮的吸收和转运<sup>[17]</sup>。玉米氮吸收效率与其生育后期叶片光合特性密切相关,延长叶片的光合作用功能期,延缓叶片衰老,增加玉米的保绿性,能够显著提高玉米产量。Martin 等<sup>[18]</sup>通过分析发现,玉米杂交种中,叶片衰老相关基因的表达模式是相同的,可能是因为不同氮效率品种间衰老信号启动时间不一样。开花后期的氮素供应不足作为外部信号可以加速叶片衰老。土壤酶活及无机氮含量等指标可以作为土壤是否缺氮的依据。有研究结果<sup>[19]</sup>表明,施氮条件下氮高效品种郑单 958 较氮低效品种秀青 73-1 显著提高了单株叶面积、叶片光合势和叶片光合色素含量,保障了氮高效玉米品种光合产物的供应,有利于籽粒灌浆。

目前大部分研究都关注控释尿素与普通尿素配施对作物产量、经济效益和氮肥利用率的影响<sup>[20]</sup>,关于控释尿素与普通尿素掺混一次性施入对不同氮效率玉米的功能叶片抗氧化酶活性及土壤酶活季节性变化规律研究较少。本试验通过两年大田试验,研究了控释尿素与普通尿素不同配比对不同氮效率玉米叶片衰老特

性、土壤酶活性、土壤无机氮及玉米产量的影响,以期寻求不同氮效率玉米品种下匹配的控释尿素与尿素的合理配比,为延缓叶片衰老及玉米优质高效安全生产的控释尿素合理高效施用技术提供一定的科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于 2018—2019 年在河南农业大学原阳科教园区 (113.94E, 35.11N) 进行。试验地地处黄淮海平原,属于温带季风气候。平均气温 18℃,年降水量 435.9 mm,平均日照时长 12 h。试验期间该地气温及降水情况见图 1,降雨集中在 6—9 月,且雨热同期。供试土壤为由河流沉积物受地下水运动影响形成的潮土,种植制度为常规小麦-玉米轮作,试验地肥力均匀,0—30 cm 耕层土壤基础地力<sup>[21]</sup>如下,有机质含量 10.6 g/kg,全氮含量 1.1 g/kg,速效磷含量 80.3 mg/kg,速效钾含量 129.5 mg/kg, pH 为 7.0。

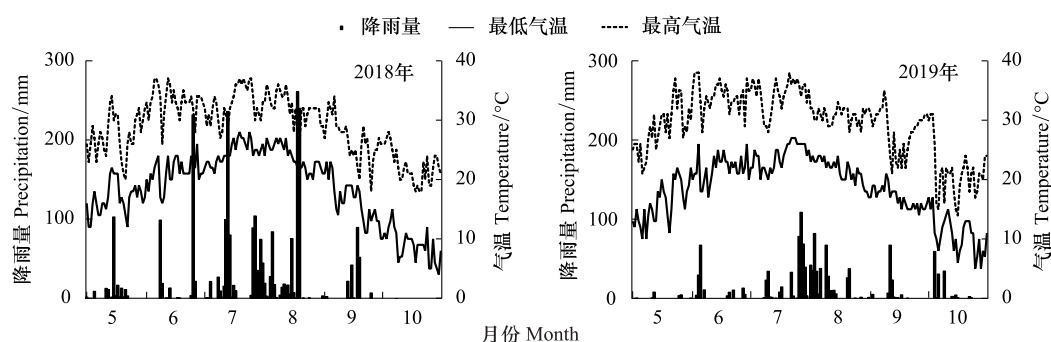


图 1 2018—2019 年夏玉米生育期间气温和降雨量

Fig.1 The temperature and daily precipitation of the experiment site during the growth period of maize in 2018—2019

### 1.2 供试材料

供试玉米品种:河南省秋乐种业生产的郑单 958(氮高效,ZD958)和河南省豫玉种业生产的豫禾 988(氮低效,YH988)<sup>[22]</sup>。供试肥料品种:普通尿素(含 N 46%)、山东茂施公司生产的控释尿素(含 N 45%,释放周期 60 d)、磷肥为过磷酸钙( $P_2O_5$ , 12%)、钾肥为硫酸钾( $K_2O$ , 52%)。

### 1.3 试验设计

试验采用裂区设计,各处理小区随机排列,重复 3 次。主区设施氮处理,裂区设两个玉米品种(郑单 958、豫禾 988),试验设置 6 种氮肥处理分别设置为:CK、N180U、N180C1、N180C2、N180C、N300U,其中 180、300 表示施氮水平,分别为 180 kg/hm<sup>2</sup>、300 kg/hm<sup>2</sup>,U 表示全尿素处理,C 为全控释尿素,C1、C2 分别表示控释尿素:普通尿素=1:2 与 2:1,以 CK 处理为对照。行距为 60 cm、株距为 25 cm,种植密度为 75000 株/hm<sup>2</sup>,控释尿素的处理是作为基肥一次性施入,全尿素的处理基追比为 2:3,追肥在拔节期进行。各处理基肥均施磷肥和钾肥,分别为  $P_2O_5$  90 kg/hm<sup>2</sup>,  $K_2O$  90 kg/hm<sup>2</sup>。采用撒施旋耕的方式,小区面积 40 m<sup>2</sup> (8.4 m×4.8 m),全生育期均按照当地习惯进行田间管理。

### 1.4 项目测定及方法

#### 1.4.1 叶面积指数

2018—2019 年采用 CI-203CA 叶面积仪测定叶面积。于玉米拔节期、吐丝期、成熟期测定单株叶片的叶面积。叶面积指数(LAI)=单株叶面积×种植密度(株/hm<sup>2</sup>)/10000

#### 1.4.2 功能叶抗氧化酶及膜脂过氧化产物

2019 年于玉米拔节期、吐丝期、成熟期进行叶片取样。具体取样方法为:每个小区选取具有代表性的 3 株玉米,拔节期选取最新展开叶,吐丝期与成熟期选取穗位叶。将选定的叶片用剪刀剪下,去除主叶脉,用锡箔纸包好置于液氮中带回实验室放在 -80℃ 冰箱进行保存。

超氧化物歧化酶(SOD)采用氮蓝四唑(NBT)法<sup>[23]</sup>,抗氧化酶(POD)采用愈创木酚法<sup>[23]</sup>,丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法<sup>[23]</sup>。

### 1.4.3 土壤酶活性

2018—2019年在玉米生育期内,分别于拔节期(V6)、吐丝期(R1)和成熟期(R6)在各处理小区随机选取3株玉米,用直径为2 cm的土钻取相应植株行间(距离植株10 cm左右)土壤,采样深度0—30 cm,混匀装入聚乙烯塑料袋中,带回实验室进行风干。土壤过1 mm筛,用于测定土壤酶活性。

脲酶活性:靛酚蓝比色法<sup>[24]</sup>,以37℃恒温培养24 h后每克土中NH<sub>3</sub>-N的质量(mg)表示;蔗糖酶:蔗糖酶活性采用3,5-二硝基水杨酸比色法<sup>[24]</sup>测定,以37℃恒温培养24 h后每克土产生还原糖的质量(mg)表示。

### 1.4.4 土壤无机氮

2019年分别于拔节期、吐丝期和成熟期在每个小区中间垄上距植株30 cm处采用三点取样法,用土钻取0—30 cm土层新鲜土样,各自混匀带回实验室,用0.01 mol/L CaCl<sub>2</sub>浸提,采用AA3流动注射分析仪测定土壤中硝态氮和铵态氮含量。

### 1.4.5 产量

2018—2019年各处理于成熟期调查每个小区的实际穗数,并选取3.6 m<sup>2</sup>有代表性玉米植株全部收获后晒干,用谷物水分仪测定每个小区籽粒含水量,并折算成14%含水量的产量。

## 1.5 数据处理

数据用Microsoft Excel 2016进行统计计算,SAS V8方差分析,新复极差法多重比较,GraphPad Prism 7作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 控释尿素与普通尿素配比对玉米叶片衰老特性及抗氧化酶活性的影响

#### 2.1.1 叶面积指数(LAI)

由图2两年的数据可知,从玉米拔节期至成熟期,各氮肥处理下的叶面积指数先增加后降低,在吐丝期达到最大值。2019年豫禾988拔节期各施氮处理叶面积指数显著高于不施氮处理,但各施氮处理间无显著差异;N180C1处理下的叶面积指数在吐丝期与成熟期均为最高,成熟期相较于N180U、N180C2、N180C、N300U分别增加了22.5%、5.4%、18.6%、14.9%;郑单958各处理间叶面积指数在拔节期差异不显著,吐丝期N180C2处理下叶面积指数最大,显著高于不施氮处理,但各施氮处理间无显著差异,与其他施氮处理相比叶面积指数高出1.3%—9.7%。成熟期各施氮处理叶面积指数显著高于不施氮处理,且在N180C2处理下叶面积指数最大,较N180U、N180C1、N180C、N300U分别提高0.7%、4.7%、10.1%、17.7%。从两品种叶面积指数比较可知,豫禾988在拔节期高于郑单958,而成熟期时郑单958叶面积指数高于豫禾988,2018年叶面积指数总体变化趋势与2019年基本一致。

#### 2.1.2 超氧化物歧化酶(SOD)活性

由图3可知,郑单958和豫禾988穗位叶SOD活性变化趋势基本一致,从拔节期到成熟期呈现出先上升后降低的趋势,在吐丝期SOD活性最高。豫禾988吐丝期N180C1、N180C2处理下SOD活性显著高于其他处理,差异达到显著水平,但N180C1处理SOD活性高于N180C2,较之提高2.8%,成熟期SOD活性迅速下降与吐丝期各处理间的表现趋势基本一致,N180C1处理与其他处理相比较提高了2.5%—18.5%;郑单958吐丝期后各施氮处理SOD活性明显高于不施氮处理,且在N180C2下达到最大值,成熟期与N180C1、N180C、N180U、N300U相比,分别增加39.0%、7.2%、22.7%、46.8%。

#### 2.1.3 过氧化物酶(POD)活性

图4表明,豫禾988和郑单958两品种穗位叶POD活性变化差别较大。豫禾988在拔节期到吐丝期这一阶段,叶片POD活性急剧上升,并在吐丝期活性趋于稳定,后期变化程度较小。郑单958自拔节期开始,叶



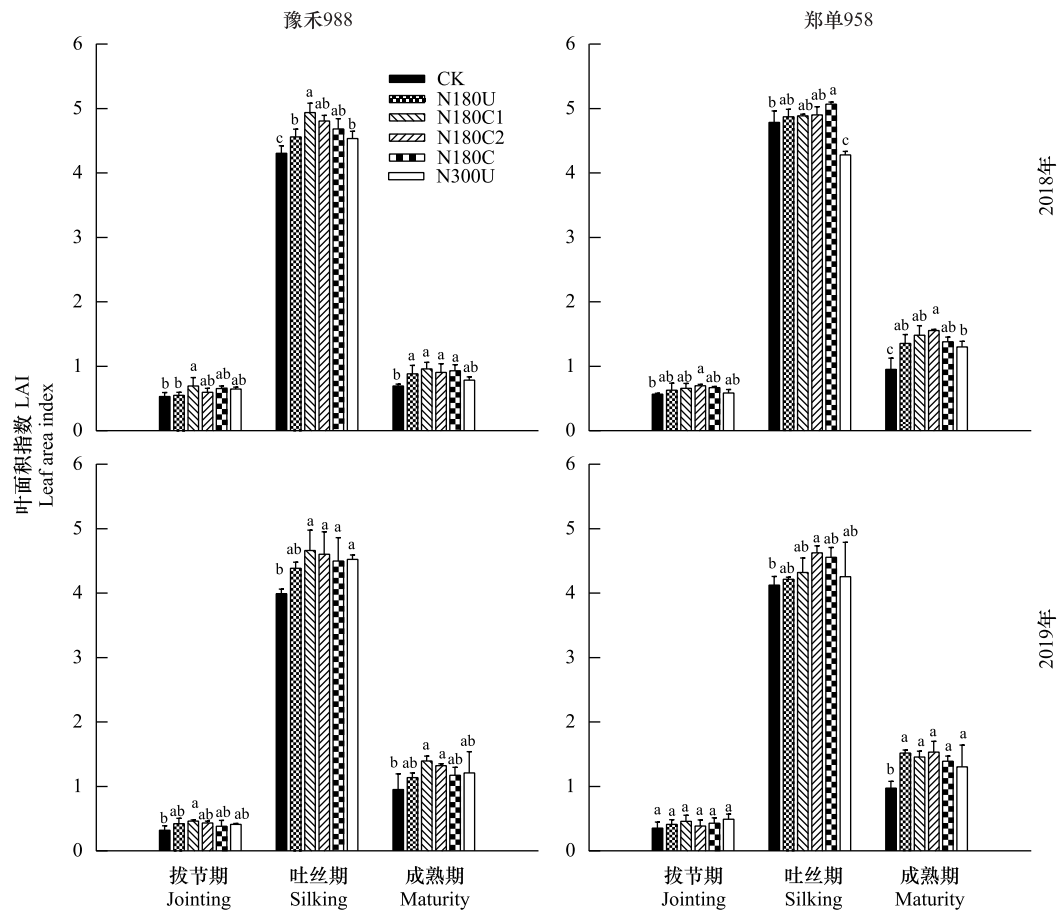


图2 氮肥处理对不同玉米品种叶面积指数 (LAI) 的影响 (2018—2019)

Fig.2 Effect of nitrogen fertilizer treatment on Leaf area Index (LAI) of different Maize cultivars (2018—2019)

柱上不同字母表示同一时期差异达 5% 显著水平

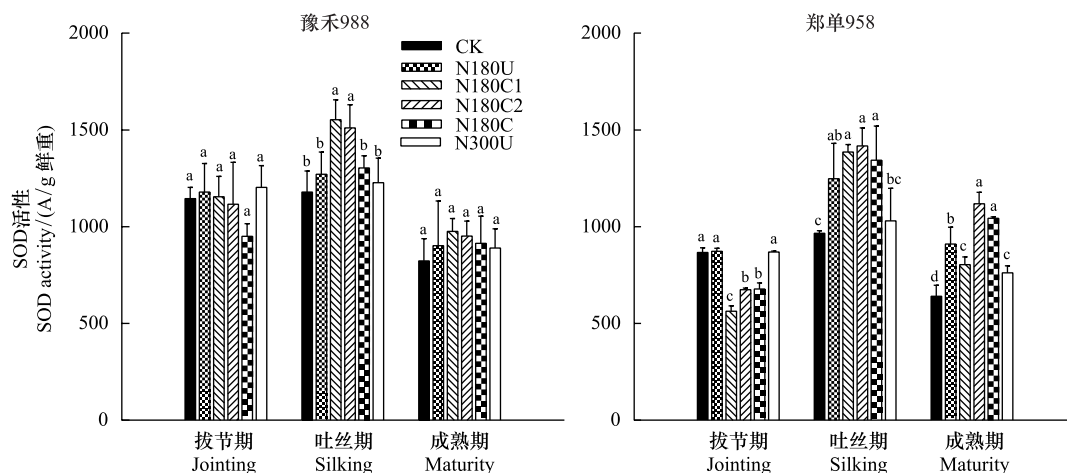


图3 氮肥处理对不同玉米品种功能叶 SOD 活性的影响 (2019)

Fig.3 Effects of nitrogen fertilizer treatment on SOD activity in the functional leaves of different maize cultivars (2019)

片 POD 活性一直持续增加,并在成熟期活性最大。豫禾 988 各时期条件下,施氮处理的叶片 POD 活性均显著高于不施氮处理,在吐丝期和成熟期 N180C1 处理下活性最大,在成熟期与 N180U、N180C2、N180C、N300U 相比较分别提高 2.5%、1.7%、1.9%、23.9%;郑单 958 在各施氮处理条件下,叶片 POD 活性显著高于不施氮处理,但施氮处理间无显著差异。在吐丝期和成熟期,叶片 POD 活性最大值均是 N180C2,成熟期与 N180U、N180C1、N180C、N300U 相比,分别提高 8.0%、5.5%、5.6%、11.2%。

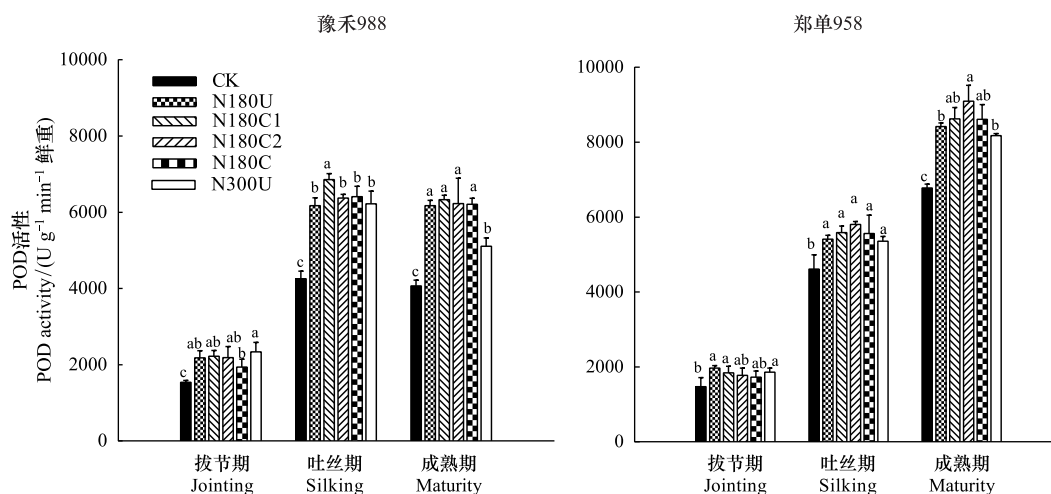


图 4 氮肥处理对不同玉米品种功能叶 POD 活性的影响(2019)

Fig.4 Effects of nitrogen fertilizer treatment on POD activity in the functional leaves of different Maize cultivars(2019)

## 2.1.4 膜脂过氧化产物(MDA)含量

图 5 反映了两玉米品种生育期内 MDA 含量的动态变化过程,随玉米生育进程的推进,MDA 含量呈现不断增加的趋势并在成熟期含量最高,施氮可以有效降低 MDA 含量。豫禾 988 在 N180C1 处理下,MDA 下降幅度最大,在成熟期较 CK 降低 22.6%。郑单 958 的 N180C2 处理在成熟期下降幅度最大,与 CK 相比,MDA 含量减少了 41.6%。

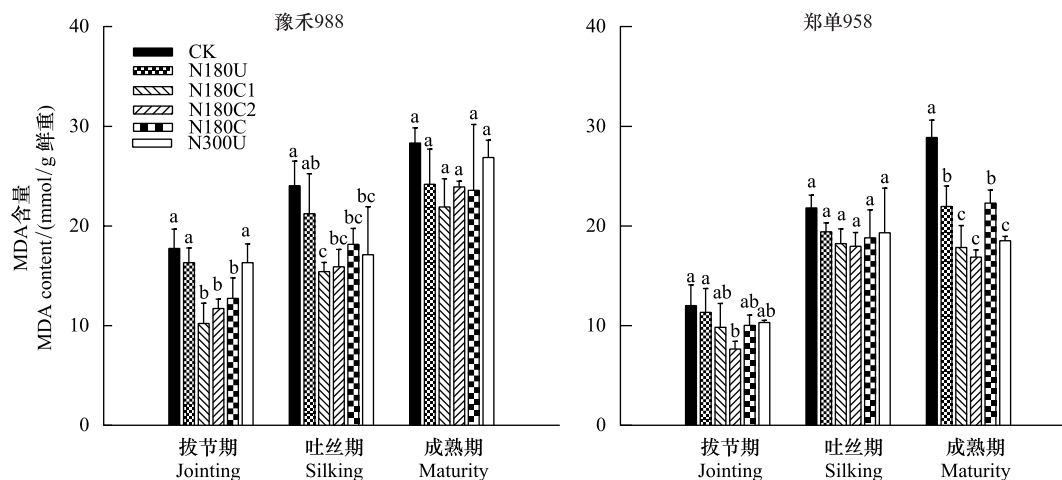


图 5 氮肥处理对不同玉米品种功能叶 MDA 含量的影响(2019)

Fig.5 Effects of nitrogen fertilizer treatment on MDA content in the functional leaves of different maize cultivars (2019)

## 2.2 控释尿素和普通尿素配施对土壤无机氮的影响

### 2.2.1 硝态氮

由图 6 可知,施氮可以显著提高土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量,豫禾 988 品种除 CK 和 N180U 处理外,其余各处理土

壤  $\text{NO}_3^-$ -N 均随着玉米生育时期的推进呈现先升高后降低的趋势,在吐丝期达到峰值,其中 N180C1 处理土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量最高为 13.18 mg/kg;郑单 958 品种各处理土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 均随着玉米生育时期的推进而逐渐减少,其中 N180C1 处理在吐丝期最高为 7.15 mg/kg, N180C2 处理在成熟期最高为 4.82 mg/kg。

### 2.2.2 铵态氮

由图 6 可知,与 CK 相比,各施氮处理能有效提高土壤  $\text{NH}_4^+$ -N 含量。豫禾 988 品种中,CK、N180C2 和 N300U 处理随着玉米生育进程的推进,土壤  $\text{NH}_4^+$ -N 含量呈现逐渐降低的趋势,其余各处理随玉米生育时期的推进呈现出先增加后减少的趋势;郑单 958 品种  $\text{NH}_4^+$ -N 含量随玉米生育进程的推进逐渐降低, N180C1 处理在拔节期土壤  $\text{NH}_4^+$ -N 含量最高为 14.43 mg/kg, N180C2 处理在吐丝期土壤  $\text{NH}_4^+$ -N 含量最高为 1.74 mg/kg。

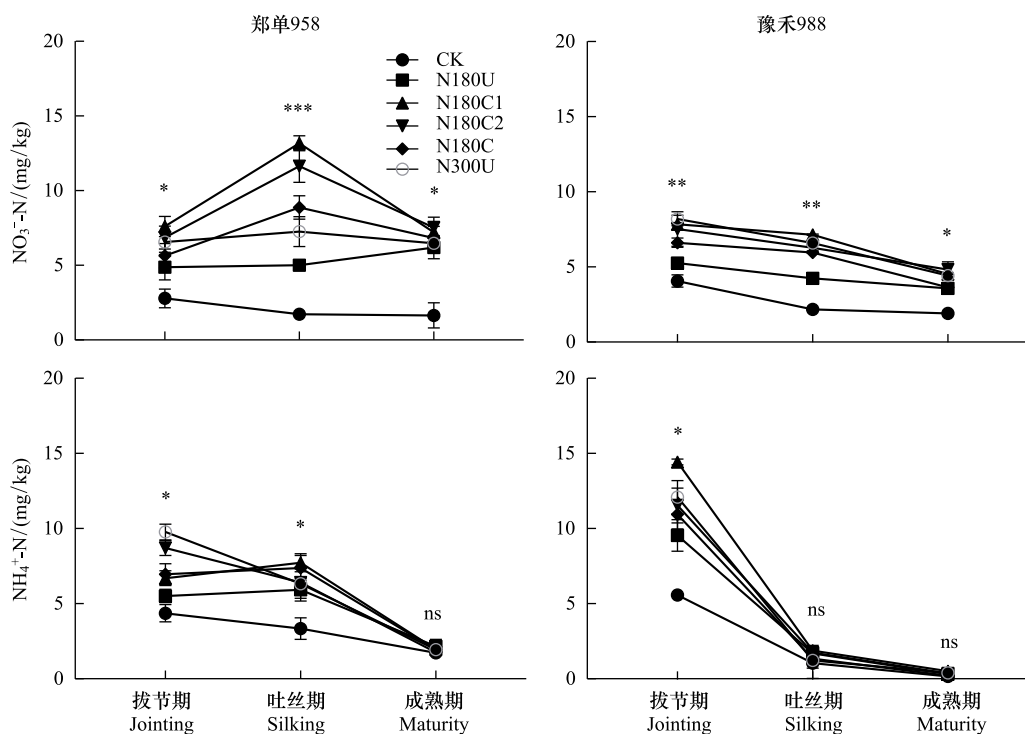


图 6 0—30 cm 土层  $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NH}_4^+$ -N 含量(2019)

Fig.6  $\text{NO}_3^-$ -N and  $\text{NH}_4^+$ -N contents in 0—30cm soil layer(2019)

ns 表示差异不显著, \* 表示在 0.05 水平显著, \*\* 表示在 0.01 水平显著, \*\*\* 表示在 0.001 水平显著

## 2.3 控释尿素和普通尿素配施对土壤酶活性的影响

### 2.3.1 脲酶活性

由表 1 数据可知,0—30 cm 土层中,与 CK 相比,各施氮处理均可有效提高土壤脲酶活性。2018 年数据表明,豫禾 988 在 N180C1 处理下各生育时期脲酶活性均显著高于其他各处理,随着玉米生育期的推进逐渐升高,成熟期达到最大值。N180C1 较同时期的 N180U、N180C2、N180C、N300U 处理分别提高了 24.8%、11.8%、35.6%、10.9%;郑单 958 在 N180C2 处理下,随着生育进程的推进,土壤脲酶活性表现为先升高后降低,吐丝期达到峰值。而且较同时期较同时期的 N180U、N180C1、N180C、N300U 处理分别增加了 19.0%、17.0%、44.2%、47.7%。年份和品种显著影响各生育时期的脲酶活性。年份和品种的交互作用对各生育时期脲酶活性影响影响达到极显著水平,处理和品种的交互作用对脲酶活性没有显著影响。年份、处理和品种三者的交互作用对脲酶活性影响达到极显著水平。

表 1 0—30cm 土层脲酶活性/(mg kg<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>)  
Table 1 Activity of urease in 0—30cm soil layer

年份 Year	品种 Variety	处理 Treatment	拔节期 Jointing	吐丝期 Silking	成熟期 Maturity
2018	豫禾 988	CK	5.278±0.081c	6.390±0.140c	5.243±0.176e
		N180U	6.596±0.127b	7.244±0.048b	6.316±0.170c
		N180C1	7.593±0.086a	7.838±0.114a	7.884±0.080a
		N180C2	6.785±0.063b	7.808±0.315a	7.051±0.103b
		N180C	5.517±0.333c	7.259±0.195b	5.813±0.106d
	郑单 958	N300U	6.709±0.223b	6.457±0.237c	7.107±0.151b
		CK	3.699±0.204d	5.225±0.080d	4.574±0.226c
		N180U	6.674±0.290b	8.667±0.021b	5.451±0.161b
		N180C1	6.847±0.146b	7.748±0.120c	5.546±0.053b
		N180C2	7.509±0.191a	8.898±0.222a	6.489±0.140a
	2019	N180C	5.662±0.221c	7.555±0.092c	4.501±0.233c
		N300U	5.772±0.280c	8.746±0.091ab	4.392±0.063c
		CK	5.547±0.039c	2.204±0.082c	0.818±0.110a
		N180U	6.079±0.197ab	2.363±0.054b	1.186±0.236a
2019	豫禾 988	N180C1	6.548±0.238a	2.692±0.080a	1.329±0.410a
		N180C2	5.600±0.192bc	2.474±0.091b	1.349±0.208a
		N180C	5.889±0.445bc	2.425±0.045b	1.259±0.403a
		N300U	5.451±0.347c	2.429±0.051b	1.117±0.368a
	郑单 958	CK	2.091±0.263d	1.559±0.010c	1.836±0.428a
		N180U	3.490±0.080bc	2.211±0.196b	2.098±0.126a
		N180C1	3.411±0.083c	2.060±0.268b	2.221±0.306a
		N180C2	3.751±0.046a	2.541±0.135a	2.276±0.253a
		N180C	3.521±0.022bc	2.024±0.210b	2.196±0.277a
	施氮处理 Nitrogen application	N300U	3.628±0.029ab	2.205±0.146b	2.197±0.269a
		ns	ns	ns	ns
		ns	ns	ns	ns
		ns	ns	ns	ns
	年份 Year	ns	ns	ns	ns
		ns	ns	ns	ns
		ns	ns	ns	ns
		ns	ns	ns	ns
	品种 Cultivar	ns	ns	ns	ns
		ns	ns	ns	ns
		ns	ns	ns	ns
		ns	ns	ns	ns
	施氮处理×年份 N×Y	ns	ns	ns	ns
		ns	ns	ns	ns
		ns	ns	ns	ns
		ns	ns	ns	ns
	施氮处理×品种 N×C	ns	ns	ns	ns
		ns	ns	ns	ns
		ns	ns	ns	ns
		ns	ns	ns	ns
	年份×品种 Y×C	ns	ns	ns	ns
		ns	ns	ns	ns
		ns	ns	ns	ns
		ns	ns	ns	ns
	施氮处理×年份×品种 N×Y×C	ns	ns	ns	ns
		ns	ns	ns	ns
		ns	ns	ns	ns
		ns	ns	ns	ns

表中数值为平均值 ± 标准差 (n=3), 不同字母表示同年不同处理间差异达到 5% 显著水平, ns 表示差异不显著, \* 表示在 0.05 水平显著, \*\* 表示在 0.01 水平显著, \*\*\* 表示在 0.001 水平显著

### 2.3.2 蔗糖酶活性

由表 2 数据可知, 2018 年豫禾 988 和郑单 958 各处理在 0—30cm 土层的蔗糖酶活性变化趋势一致, 均随玉米生长发育呈现降低趋势, 成熟期达到最低。豫禾 988 的 N180C1 处理土壤蔗糖酶活性在拔节期和吐丝期较其他各处理显著提高, 在成熟期 N180C1 处理比同时期 N180C2、N180C 处理高出 2.2%、11.9%; 郑单 958 的 N180C2 处理在各生育时期均高于同等施氮水平下的其他处理, 在成熟期比同时期 N180U、N180C1、N180C、N300U 处理分别提高 4.9%、4.6%、11.4%、3.4%。2019 年豫禾 988 的 N180C 处理土壤蔗糖酶活性在拔节期和吐丝期相对较高, 在成熟期 N180U 处理在该时期比 N180C1、N180C2、N180C 处理增加 15.0%、17.5%、9.8%; 郑单 958 的 N180U 处理在玉米生与前期蔗糖酶活性相对较高, 拔节期 N180U 处理分别较 N180C1、N180C2、N180C 处理高 1.5%、1.6%、5.6%, 但是在成熟期 N180C1 较 N180U、N180C2、N180C 处理提高了 1.8%、13.2%、8.1%, 说明在生育后期控释尿素与尿素掺混处理可以提高土壤耕层肥力, 给玉米提供生长所需的氮素。施氮



处理在成熟期对蔗糖酶活性有显著影响,而在拔节期和吐丝期无显著影响。年份及年份和品种交互作用在拔节期对蔗糖酶活性影响显著,在吐丝期和成熟期无显著影响。施氮处理、年份和品种的交互对拔节期和吐丝期蔗糖酶活性影响达到极显著水平。

表 2 0—30cm 土层蔗糖酶活性/(mg kg<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>)

Table 2 Sucrase activity in 0—30cm soil layer

年份 Year	品种 Variety	处理 Treatment	拔节期 Jointing	吐丝期 Silking	成熟期 Maturity
2018	豫禾 988	CK	47.060±2.189e	41.834±2.437c	36.464±1.256d
		N180U	58.618±0.051c	45.469±2.594c	43.328±2.762ab
		N180C1	67.830±2.232a	58.835±3.789a	41.164±0.646bc
		N180C2	62.688±3.488b	52.800±2.219b	40.293±0.506c
		N180C	58.829±1.601bc	53.545±0.055b	36.774±0.210d
		N300U	52.984±2.339d	50.192±2.525b	44.581±1.684a
	郑单 958	CK	43.241±0.787c	38.484±0.646c	34.690±1.122c
		N180U	62.989±1.540a	50.142±3.597b	44.581±0.307ab
		N180C1	58.070±3.453b	52.576±3.446ab	44.718±1.151ab
		N180C2	65.452±2.177a	54.497±2.555ab	46.759±2.649a
		N180C	55.602±3.619b	51.666±0.921ab	41.968±4.265b
		N300U	64.279±3.017a	54.741±2.053a	45.217±3.476ab
2019	豫禾 988	CK	41.745±0.673b	47.663±1.023b	37.797±2.639d
		N180U	49.874±7.870a	48.400±3.077b	47.328±0.887a
		N180C1	45.452±2.636ab	48.199±2.354b	41.164±0.646bcd
		N180C2	48.534±2.879ab	49.947±3.228b	40.293±0.506cd
		N180C	51.214±4.642a	57.785±2.063a	43.107±2.257bc
		N300U	52.286±4.499a	51.147±3.581b	44.581±3.694ab
	郑单 958	CK	41.771±1.552c	42.359±0.659c	36.357±0.717d
		N180U	44.332±1.226a	47.395±1.135a	44.581±0.307ab
		N180C1	43.680±1.398ab	44.224±0.958b	45.385±0.989a
		N180C2	43.636±0.742ab	42.663±1.186bc	40.092±0.953c
		N180C	41.968±0.119b	41.350±0.594c	41.968±1.685bc
		N300U	44.581±1.674a	46.189±0.830a	45.217±3.476a
施氮处理 Nitrogen application			ns	ns	* * *
年份 Year		* * *	ns	ns	
品种 Cultivar		ns	ns	ns	
施氮处理×年份 N×Y		* *	ns	* *	
施氮处理×品种 N×C		ns	ns	* *	
年份×品种 Y×C		* * *	ns	ns	
施氮处理×年份×品种 N×Y×C		* * *	* * *	ns	

## 2.4 控释尿素和普通尿素配施对玉米产量的影响

从图 7 可以看出,2018—2019 施氮能够显著提高玉米产量,两年的产量表现基本一致。2018—2019 年豫禾 988 和郑单 958 均在 180 kg/hm<sup>2</sup>施氮水平下表现出较高的产量水平,其中豫禾 988 和郑单 958 分别在控释氮:尿素氮为 1 : 2 (N180C1) 和 2 : 1 (N180C2) 的配比下产量最高,分别为 9758.8—11334.7 kg/hm<sup>2</sup> 和 9848.0—11023.3 kg/hm<sup>2</sup>。

## 3 讨论

叶片是玉米进行光合作用的重要器官<sup>[25]</sup>,叶面积指数(LAI)与产量之间有着密切的关系。玉米叶片衰

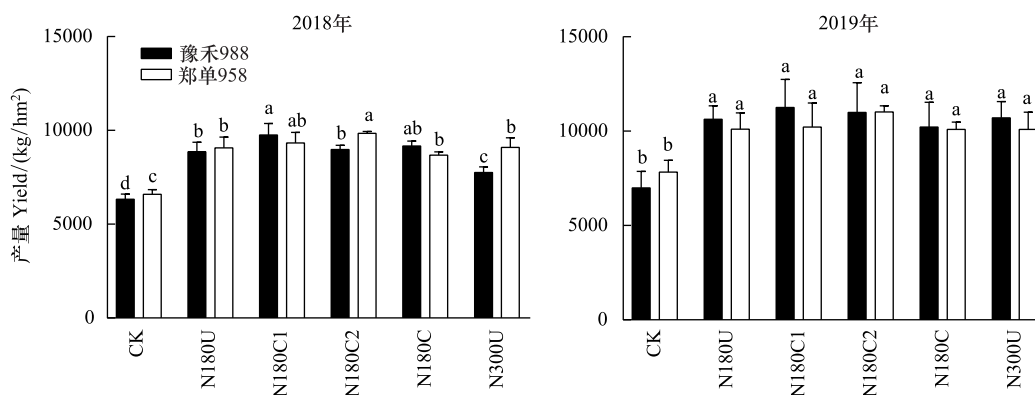


图7 2018—2019年玉米产量图

Fig.7 Maize yield in 2018—2019

老过程是氮素从同化过程向再转移过程的转变,为籽粒生长提供所需的氮源,延长绿叶持续期进而延长籽粒有效灌浆时间是获得高产的重要条件<sup>[26-27]</sup>。温立玉<sup>[28]</sup>研究表明施氮延缓了花后植株下部叶片的衰老与脱落,延长了 LAI 高值持续期,在籽粒灌浆期保持了较高的光合面积。米国华<sup>[29]</sup>研究发现,在高氮条件下,氮高效品种在绿叶保持性方面明显具有优势,而氮低效品种叶片光合效率则显著降低。本研究结果表明施氮显著提高了玉米吐丝期和成熟期的叶面积指数,豫禾 988 在 N180C1 和郑单 958 在 N180C2 处理下,效果最为显著。结果表明不同氮效率玉米品种,配合控释尿素与尿素合理配比可以延长玉米花后绿叶持续期,改善玉米光合作用,进而提高产量。

玉米生育后期活性氧清除酶活性降低,活性氧积累氧化细胞膜蛋白,加剧膜脂过氧化作用,进而导致叶片衰老脱落,降低产量<sup>[30]</sup>。而植物本身也有一些防御机制来延缓衰老,如活性氧酶促清除系统,SOD 是该系统的第一道防线,催化超氧自由基歧化成  $H_2O_2$  和  $O_2$ 。POD 可以清除植物体内的  $H_2O_2$ ,与 SOD 协同保护体内活性氧代谢平衡。MDA 是过氧化物会与细胞内多种成分发生反应,严重损害多种酶活性和膜系统,其含量的升高代表了叶片的衰老<sup>[31]</sup>。本课题组前期的研究结果表明,氮低效品种豫禾 988 在 N180C1 (CRU-N : Urea-N = 1:2) 处理下,依靠后期持续吸氮延缓衰老,氮高效品种郑单 958 在 N180C2 (CRU-N : Urea-N = 2:1) 处理下,依靠后期茎秆转移氮素实现了较高的氮累积量。本试验结果进一步表明豫禾 988 在 N180C1 和郑单 958 在 N180C2 处理下,能够显著降低 MDA 含量和提高叶片 SOD、POD 活性,有效清除活性自由基,延缓叶片衰老进程。豫禾 988 的叶片 POD 活性在吐丝期显著高于郑单 958,说明豫禾 988 植株叶片较郑单 958 较早进入衰老阶段,同时也说明氮高效品种叶片较氮低效在生育后期具有更好的光合功能,延长了叶片的功能期,更有利于植株的生长发育和产量的提高。

土壤中无机氮含量能够体现土壤中可利用氮水平的高低,也直接反映其对作物的营养供应能力,是评价外源氮投入是否适宜的重要依据之一<sup>[32-33]</sup>。本试验结果表明在豫禾 988 品种下,N180C1 处理在拔节期、吐丝期及成熟期土壤硝态氮含量均保持较高水平,在拔节期 N300U 土壤铵态氮含量高于其他施氮处理,在吐丝期和成熟期却低于 N180C1 处理;在郑单 958 品种下,N180C2 处理在吐丝期和成熟期也保持较高水平且较稳定。本试验中控释尿素和尿素以不同比例配施使得氮素营养的释放与玉米养分的吸收相互匹配,延长了氮素的供应周期,维持并提高了土壤供氮能力,满足了玉米“氮素后移”的需求规律,促进了玉米的生长发育,进而提高产量。土壤酶能够影响土壤的生化活性、养分的组成与转化,对土壤肥力有直接影响<sup>[34-35]</sup>。脲酶广泛存在于土壤中,是一种分解酰胺态氮的酶,能促进有机质分子中肽键的水解,生成铵离子,改善土壤有效氮含量<sup>[36]</sup>。本研究发现豫禾 988 的 N180C1 和郑单 958 的 N180C2 处理下脲酶和蔗糖酶在整个生育时期一直保持较高活性,而在成熟期豫禾 988 却低于郑单 958,这可能是由于 N180C1 (CRU-N : Urea-N = 1:2) 处理速效氮肥前期释放较快,豫禾 988 在前期吸氮量较高刺激了土壤酶活性,而后期叶片的早衰导致吸氮量减少所以酶

活性降低。豫禾 988 的 N180C1 和郑单 958 的 N180C2 处理在生育后期土壤脲酶和蔗糖酶活性相对稳定,且保持较高水平,说明控释普通尿素与尿素配施在玉米生育后期还能释放大量氮素,维持了较高的无机氮水平,降低了氮素损失。李潮海<sup>[37]</sup>等研究表明土壤脲酶、蔗糖酶活性除与施肥有关外,还可能与作物生长有关,在作物生长过程中根系分泌物逐渐增加,促进了根系周边土壤微生物的生长,进而增加了脲酶和蔗糖酶活性。对土壤微生物研究还需后续的试验进一步验证。

#### 4 结论

通过 2018—2019 年的试验结果表明,豫禾 988 和郑单 958 分别在控释氮:尿素氮为 1:2 和 2:1 的配比下,能够通过前期尿素氮的快速释放和后期控释氮的持续释放的互补作用来延缓地上部玉米功能叶片衰老,延长功能期,提高叶片抗衰老特性;同时也增加了生育后期地下部土壤酶活性和土壤无机氮含量,提升了土壤肥力,实现了玉米的增产稳产,为黄淮海夏玉米精简化栽培提供了科学有效的施肥模式。

#### 参考文献 (References):

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- [2] 刘春晓, 赵海军, 董树亭, 王庆成, 李宗新, 刘开昌. 玉米不同基因型双列杂交后代抽丝后氮素代谢特性. 中国农业科学, 2014, 47(1): 33-42.
- [3] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 崔振岭, 马文奇, 陈新平, 江荣风. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924.
- [4] 王宜伦, 李潮海, 谭金芳, 韩燕来, 张许. 超高产夏玉米植株氮素积累特征及一次性施肥效果研究. 中国农业科学, 2010, 43(15): 3151-3158.
- [5] 冯小杰, 战秀梅, 王雪鑫, 陈坤, 彭靖, 韩晓日. 包膜尿素不同配比减施对土壤无机氮含量及玉米氮素吸收的影响. 中国农业科学, 2019, 52(10): 1733-1745.
- [6] 谷佳林, 边秀举, 徐凯, 张东雷, 朱文, 刘宝存, 赵同科, 方瑞元, 曹兵, 邹国元. 不同缓控释氮肥对高羊茅草坪生长及氮素挥发的影响. 草业学报, 2013, 22(2): 235-242.
- [7] 吕丽华, 赵明, 赵久然, 陶洪斌, 王璞. 不同施氮量下夏玉米冠层结构及光合特性的变化. 中国农业科学, 2008, 41(9): 2624-2632.
- [8] 董树亭, 高荣岐, 胡昌浩, 王群瑛, 王空军. 玉米花粒期群体光合性能与高产潜力研究. 作物学报, 1997, 23(3): 318-325.
- [9] 战秀梅, 韩晓日, 杨劲峰, 王帅, 高鸣, 赵立勇. 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. 玉米科学, 2007, 15(1): 123-127.
- [10] 刘艳, 汪仁, 华利民, 解占军. 施氮量对玉米生育后期叶片衰老与保护酶系统的影响. 玉米科学, 2012, 20(2): 124-127.
- [11] 李小勇, 唐启源, 李迪秦, 李维科, 李海林, 蔡庆红. 不同种植密度对超高产稻田春玉米产量性状及光合生理特性的影响. 华北农学报, 2011, 26(5): 174-180.
- [12] 张倩, 张洪生, 宋希云, 姜雯. 种植方式和密度对夏玉米光合特征及产量的影响. 生态学报, 2015, 35(4): 1235-1241.
- [13] Gianfreda L, Sannino F, Violante A. Pesticide effects on the activity of free, immobilized and soil invertase. Soil Biology and Biochemistry, 1995, 27(9): 1201-1208.
- [14] 方昉, 吴承祯, 洪伟, 范海兰, 宋萍. 植物根际、非根际土壤酶与微生物相关性研究进展[J]. 亚热带农业研究, 2007(3): 209-215.
- [15] 田幼华, 吕光辉, 杨晓东, 谢辉, 孙丽君. 水盐胁迫对于干旱区植物根际土壤酶活性的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(03): 158-215.
- [16] 武鹏, 王玉凤, 张翼飞, 陈天宇, 杨丽, 薛盈文, 杨克军. 不同土层深度配施缓释/普通尿素对土壤氮素和酶活性及玉米产量的影响. 应用生态学报, 2020, 31(1): 129-138.
- [17] 米国华, 刘建安, 张福锁. 玉米杂交种的氮农学效率及其构成因素剖析. 中国农业大学学报, 1998, 3(S4): 97-104.
- [18] Martin A, Belastegui-Macadam X, Quilleré I, Floriot M, Valadier M H, Pommel B, Andrieu B, Donnison I, Hirel B. Nitrogen management and senescence in two maize hybrids differing in the persistence of leaf greenness: agronomic, physiological and molecular aspects. New Phytologist, 2005, 167(2): 483-492.
- [19] 程乙, 王洪章, 刘鹏, 董树亭, 赵久然, 王荣焕, 张吉旺, 赵斌, 李耕, 刘月娥. 品种和氮素供应对玉米根系特征及氮素吸收利用的影响. 中国农业科学, 2017, 50(12): 2259-2269.
- [20] 衣文平, 朱国梁, 武良, 谷佳林, 李亚星, 许俊香, 史桂芳, 徐秋明. 不同量的包膜控释尿素与普通尿素配施在夏玉米上的应用研究. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(6): 1497-1502.

- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000: 79-109.
- [22] 王玲敏, 叶优良, 陈范骏, 尚云峰. 施氮对不同品种玉米产量、氮效率的影响. 中国生态农业学报, 2012, 20(5): 529-535.
- [23] 邹琦. 植物生理学实验指导. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [24] 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社, 1986.
- [25] 董民堂, 闫彩清, 孙迪, 李凌雨, 王学雄. 叶片在玉米高产育种、栽培中的应用. 山西农业科学, 2013, 41(7): 680-682.
- [26] 李广浩, 刘平平, 赵斌, 董树亭, 刘鹏, 张吉旺, 田翠霞, 何在菊. 不同水分条件下控释尿素对夏玉米产量和叶片衰老特性的影响. 应用生态学报, 2017, 28(2): 571-580.
- [27] 田琳, 谢晓金, 包云轩, 胡继超, 於俐, 王金鑫. 不同生育期水分胁迫对夏玉米叶片光合生理特性的影响. 中国农业气象, 2013, 34(6): 655-660.
- [28] 温立玉, 薛艳芳, 张慧, 张秀清, 高英波, 刘开昌, 李宗新. 不同氮效率玉米品种亲本自交系花粒期氮素转运特性. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(4): 568-578.
- [29] 米国华, 陈范骏, 春亮, 郭亚芬, 田秋英, 张福锁. 玉米氮高效品种的生物学特征. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(1): 155-159.
- [30] 张永峰, 殷波. 混合盐碱胁迫对苗期紫花苜蓿抗氧化酶活性及丙二醛含量的影响. 草业学报, 2009, 18(1): 46-50.
- [31] 郑春芳, 姜东, 戴廷波, 荆奇, 曹卫星. 外源一氧化氮供体硝普钠浸种对盐胁迫下小麦幼苗碳氮代谢及抗氧化系统的影响. 生态学报, 2010, 30(5): 1174-1183.
- [32] 冯爱青, 张民, 李成亮, 杨越超. 控释氮肥对土壤酶活性与土壤养分利用的影响. 水土保持学报, 2014, 28(3): 177-184.
- [33] 董燕, 王正银. 缓/控释复合肥料对土壤氮素库的调控作用. 生态学报, 2010, 30(24): 6707-6714.
- [34] Waldrop M P, Balser T C, Firestone M K. Linking microbial community composition to function in a tropical soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(13): 1837-1846.
- [35] 和文祥, 谭向平, 王旭东, 唐明, 郝明德. 土壤总体酶活性指标的初步研究. 土壤学报, 2010, 47(6): 1232-1236.
- [36] 袁玲, 杨邦俊, 郑兰君, 刘学成. 长期施肥对土壤酶活性和氮磷养分的影响. 植物营养与肥料学报, 1997, 3(4): 300-306.
- [37] 李潮海. 土壤物理性质对玉米的生态生理效应及其调控[D]. 郑州: 河南农业大学, 2002.