

灌溉与尿素类型对玉米花后穗位叶衰老、产量和效益的影响

邵国庆^{1,2}, 李增嘉¹, 宁堂原¹, 蒋保娟³, 焦念元⁴

(¹山东农业大学农学院/作物生物学国家重点实验室, 山东泰安 271018; ²微山县农业局农业技术推广站, 山东济宁 277600; ³枣庄市薛城区劳动和社会保障局, 山东枣庄 277100; ⁴河南科技大学农学院, 河南洛阳 471003)

摘要: 【目的】研究不同水分条件下, 包膜控释尿素与常规尿素用量对玉米穗位叶衰老、产量和效益的影响。【方法】采用随机区组设计 5 个施氮水平和 2 个水分水平, 研究不同类型尿素与水分耦合对玉米花后不同时期穗位叶含水量、净光合速率、超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD) 和过氧化氢酶 (CAT) 活性、丙二醛 (MDA) 和可溶性蛋白含量的影响, 比较处理间的产量和经济效益差异, 讨论花后穗位叶衰老与产量的关系。【结果】相同水分条件下, 与常规尿素相比, 开花期包膜控释尿素处理玉米穗位叶净光合速率较低, 花后始终保持较高值, 且越到后期优势越大。相同施氮水平下, 与常规尿素相比, 包膜控释尿素处理可显著提高玉米穗位叶含水量、SOD、POD 和 CAT 酶活性, 增加可溶性蛋白含量, 降低 MDA 积累量, 因而包膜控释尿素处理可显著提高玉米籽粒产量和经济效益; 灌浆水有利于延缓穗位叶衰老, 可显著提高籽粒产量和经济效益。由于包膜控释尿素成本较高, 在灌浆水条件下施氮量较高时经济效益低于常规控释尿素。【结论】与常规尿素相比, 包膜控释尿素与灌溉对籽粒产量和经济效益的耦合效应更显著, 其原因是提高了叶片活性氧清除酶活性, 增加了可溶性蛋白含量, 降低了 MDA 的积累量, 延缓叶片衰老和提高净光合速率, 有利于高产。随着包膜控释尿素产量的增加和成本的降低, 它在粮食作物生产上应用前景非常广阔。

关键词: 灌溉; 尿素类型; 玉米; 衰老; 产量; 效益

Effects of Irrigation and Urea Types on Ear Leaf Senescence After Anthesis, Yield and Economic Benefit of Maize

SHAO Guo-qing^{1,2}, LI Zeng-jia¹, NING Tang-yuan¹, JIANG Bao-juan³, JIAO Nian-yuan⁴

(¹State Key Laboratory of Crop Biology/Agronomy College, Shandong Agricultural University, Taian 271018, Shandong; ²Agrotechnology Extension Station, Agricultural Bureau of Weishan County, Jining 277600, Shandong; ³Labor & Social Security Bureau of Xuecheng Zone, Zaozhuang 277100, Shandong; ⁴College of Agronomy, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, Henan)

Abstract: 【Objective】 The objective of the study is to investigate the effects of application rates of normal urea (NU) and controlled release urea (CU) on ear leaf senescence, yield and economic benefit of summer maize under different water conditions. 【Method】 Five nitrogen rates and two irrigation levels were designed to investigate the effects of water-nitrogen coupling on photosynthetic rate, superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), catalase (CAT), malondialdehyde (MDA) content and soluble protein content in maize ear leaves after anthesis, and their relationship with grain yield and economic benefit. 【Result】 At the same irrigation level, net photosynthetic rate of maize applied with controlled CU was lower ($P < 0.05$) than that applied with NU at anthesis, but the situation was just contrary after anthesis. At the same nitrogen level, compared with the NU, CU can significantly increase water content, activities of SOD, POD and CAT, and the content of soluble protein in ear leaves, but reduce MDA content.

收稿日期: 2009-03-04; 接受日期: 2009-07-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30900876)、2008 年公益性行业 (农业) 科研专项经费 (200803028)、国家科技支撑计划 (2006BAD10B07)、山东省资源节约型社会科技支撑体系建设专项计划 (2006JY06)、山东省中青年科学家科研奖励基金计划 (2007BS06017)

作者简介: 邵国庆 (1981—), 男, 山东枣庄人, 硕士研究生, 研究方向为农业肥水资源高效利用。E-mail: sgq-1981@163.com。通信作者宁堂原 (1976—), 男, 山东日照人, 副教授, 博士, 研究方向为农业资源利用、农业生态学和高产优质高效种植制度。Tel: 0538-8249737; E-mail: ningty@163.com

So, the grain yield and economic benefit of maize applied with CU was higher than that applied with NU, and irrigation is beneficial to improve the superiority of CU. But because of the higher cost of CU, when higher CU were used with irrigation, the economic benefit was lower than NU. 【Conclusion】 Compared with the NU, the positive coupling effect of CU might be caused by the higher SOD, POD and CAT activities and soluble protein content, and the lower MDA content after anthesis, which could delay the senescence and increase the net photosynthetic rate of ear leaf, and as a result, increase the grain yield of maize. With the increase of CU production, its cost will be decreased and its use prospect will be wider in crop production.

Key words: irrigation; urea types; maize; senescence; yield; economic benefit

0 引言

【研究意义】合理的灌溉和施肥是调控作物生长发育、提高作物产量的一项重要措施。玉米开花以后叶片衰老和产量形成同步,穗位叶是该时期的功能叶片,其光合特性和活性氧代谢的变化对玉米产量的形成具有重要影响^[1]。延长玉米叶片功能期、促进叶片制造更多光合产物,已成为玉米高产生理的重要科学问题之一^[2]。【前人研究进展】前人研究表明,植物生育后期细胞间的活性氧产生与清除之间的平衡受到破坏,积累起来的活性氧对细胞造成伤害^[3-4]。超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)是植物活性氧代谢过程中极为重要的保护酶类,在生物体内具有清除氧自由基的作用^[5-6];丙二醛(MDA)是膜脂过氧化的主要产物之一,其含量多少标志着脂质过氧化水平^[7]。因而,常用SOD、POD、CAT酶活性、MDA及可溶性蛋白质含量等可作为叶片衰老的生理生化指标^[4]。土壤水分胁迫或氮素供应不足均造成SOD、POD和CAT酶活性降低,引起活性氧积累,导致膜脂过氧化产物MDA增加,叶绿素降解和光合酶活性下降,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^[8-11]。活性氧代谢的失调是引起作物叶片早衰减产的重要原因之一^[1,12]。水分和氮素对玉米叶片衰老及产量不仅存在单独效应,也存在耦合效应。在节水节肥条件下,通过氨水耦合也可以实现玉米高产^[13-15]。

【本研究切入点】灌溉或施氮对玉米衰老的调控机理及其与产量关系的研究多是单独进行的,且氮肥多采用常规氮肥。水分与氮肥对玉米叶片衰老及产量的耦合效应鲜见报道。与常规肥料相比,包膜控释肥料可显著提高氮素利用率,提高玉米产量,并减少对环境的污染^[16-17]。随着包膜控释尿素产量的增加和生产成本的降低,包膜控释尿素在玉米等作物上的广泛应用是化学肥料发展的重要趋势之一。【拟解决的关键问题】本试验在大田条件下取样并进行室内酶活性的测

定,探讨不同水分条件下常规尿素和包膜控释尿素用量对玉米花后穗位叶衰老、产量和效益的影响,为提高玉米氮素与水分利用率、实现玉米高产优质高效安全栽培提供理论依据和技术借鉴。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于2006~2007年在山东农业大学农学试验站进行。试验区玉米生育期间(6月中旬到9月底)多年平均降水量为512 mm,2006年降水量为525 mm,2007年降水量为539 mm。土壤为棕壤土,0~20 cm土层含有机质12.93 g·kg⁻¹,全氮1.01 g·kg⁻¹,碱解氮89.88 mg·kg⁻¹,速效磷52.78 mg·kg⁻¹,速效钾88.92 mg·kg⁻¹。水分设2个水平,分别为全生育期不灌水(W0)、浇灌浆水85 mm(W1)。氮素设5个水平,分别为不施尿素(N0)、施常规尿素75 kgN·hm⁻²(N1)、施常规尿素150 kgN·hm⁻²(N2)、施包膜控释尿素75 kgN·hm⁻²(CN1)、施包膜控释尿素150 kgN·hm⁻²(CN2)。尿素全部底施,随机区组设计,小区面积60 m²,重复3次。控释尿素为树脂包膜尿素,含N量为43.47%,由山东农业大学研制、山东金正大生态工程股份有限公司生产。常规尿素含氮量为46%。玉米品种为郑单958,6月12日播种,8月9日开花,10月1日收获。播前对种子进行精选,以保证纯度和出苗整齐。

1.2 测定项目和方法

1.2.1 穗位叶含水量的测定 标记同一天开花的玉米植株穗位叶,每10 d测定一次。每小区选均匀一致植株5株,迅速取下穗位叶,用自封塑料袋封装,称鲜重;然后105℃杀青30 min,80℃烘至恒重,称干重,计算叶片含水量。

1.2.2 穗位叶光合速率的测定 测定部位为已标记的穗位叶,每10 d测定1次。用英国PP-systems公司生产的CIRAS-2型便携式光合测定系统于晴天上午9:30—11:30之间测定,每处理测定至少重复6次。

1.2.3 SOD、POD、CAT活性、可溶性蛋白和MDA含量

的测定 于开花期及开花后每隔 10 d 取穗位叶后留鲜样用于室内试验项目的测定。留鲜样于液氮中速冻 4 h 后,放入 -40°C 冰箱中保存,用于酶活性的测定。SOD 活性测定参照王爱国等^[18]方法,以抑制 NBT 光化还原 50%的酶量为 1 个酶活力单位;CAT 活性测定采用紫外吸收法^[19];POD 活性测定用愈创木酚法^[20];可溶性蛋白含量参照 Bradford^[21]的方法测定;MDA 含量测定参照林植芳等^[7]的方法,其值用每 mg 蛋白质所含的 MDA 量表示。

1.2.4 玉米籽粒产量及产量构成因素的测定 成熟期每小区随机选取 5 m 双行,将地上部全部收获,按秸秆和籽粒分开,风干后称重并计算生物产量和籽粒产量;从每小区所收果穗中随机选取 20 穗,调查穗粒数,然后脱粒、晒干,测定千粒重。

1.3 数据分析与处理

采用 Origin Pro 8.0 和 DPS 7.05 进行数据分析与处理。两年的试验结果趋势基本一致,各处理数据均为两年的平均数。

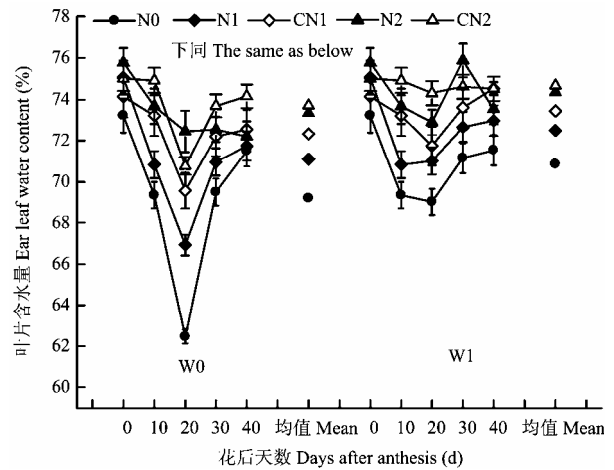
2 结果与分析

2.1 不同处理对玉米穗位叶含水量的影响

灌溉、尿素类型和用量对玉米穗位叶含水量有显著影响(图 1)。从花后 30 d 至成熟,施氮量相同时,包膜控释尿素处理的玉米穗位叶含水量均显著高于常规尿素。可见,包膜控释尿素氮素的缓慢释放利于后期维持较高的叶片含水量。同一类型肥料相比,施氮量增加时叶片含水量也显著增加。施氮条件下,灌水处理的叶片含水量均高于不灌水处理,表明灌水处理也有利于玉米花后维持较高的叶片含水量。

2.2 不同处理对玉米穗位叶净光合速率(P_n)的影响

施氮能显著提高玉米花后穗位叶的光合速率,灌水时增幅更显著(图 2)。与常规尿素相比,开花期包膜控释尿素处理的光合速率略低,花后光合速率始终保持较高值,在成熟期包膜控释尿素处理的光合速率显著高于常规尿素。可见,包膜控释尿素氮素的缓慢释放利于后期维持较高的光合速率。同一类型肥料相比,光合速率随着施氮量的增加显著增加。与不灌水相比,灌水条件下各施氮处理的光合速率平均提高 6.3%,表明灌水有利于维持花后较高的光合速率。不同衰老阶段,净光合速率的平均优势均以施用包膜控释尿素处理最高,而且后期优势更大,灌浆水能显著提高这种优势。



W0 为全生育期不灌水、W1 浇灌浆水 85mm。N0 为不施尿素、N1 施常规尿素 $75 \text{ kgN}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、N2 施常规尿素 $150 \text{ kgN}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、CN1 施包膜控释尿素 $75 \text{ kgN}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、CN2 施包膜控释尿素 $150 \text{ kgN}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。下同 W0-no irrigated water in whole growing period, W1-irrigated 85mm water at grain filling stage. N0-no nitrogen used (control), N1- $75 \text{ kgN}\cdot\text{hm}^{-2}$ normal urea, N2- $150 \text{ kgN}\cdot\text{hm}^{-2}$ normal urea, CN1- $75 \text{ kgN}\cdot\text{hm}^{-2}$ controlled release urea, CN2- $150 \text{ kgN}\cdot\text{hm}^{-2}$ controlled release urea. The same as below

图 1 不同处理玉米穗位叶含水量的动态变化

Fig. 1 Dynamics of water content in ear leaf of maize in different treatments

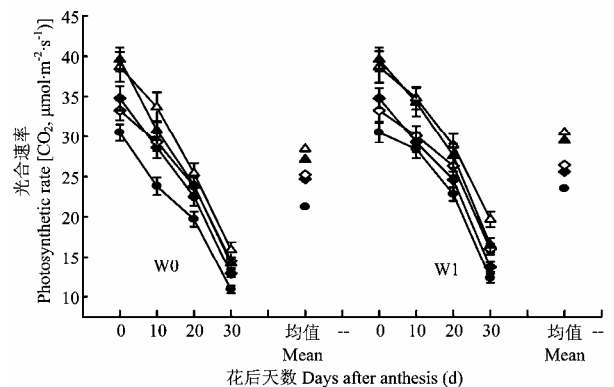


图 2 不同处理玉米穗位叶净光合速率的动态变化

Fig. 2 Dynamics of net photosynthetic rate in ear leaf of maize in different treatments

2.3 不同处理对玉米穗位叶 CAT、SOD 和 POD 活性的影响

灌溉、尿素类型和用量对玉米穗位叶 SOD、POD 和 CAT 3 种保护酶活性有显著影响(图 3)。在成熟期,施氮量相同时,包膜控释尿素处理的玉米穗位叶 SOD、POD 和 CAT 活性均显著高于常规尿素。可见,

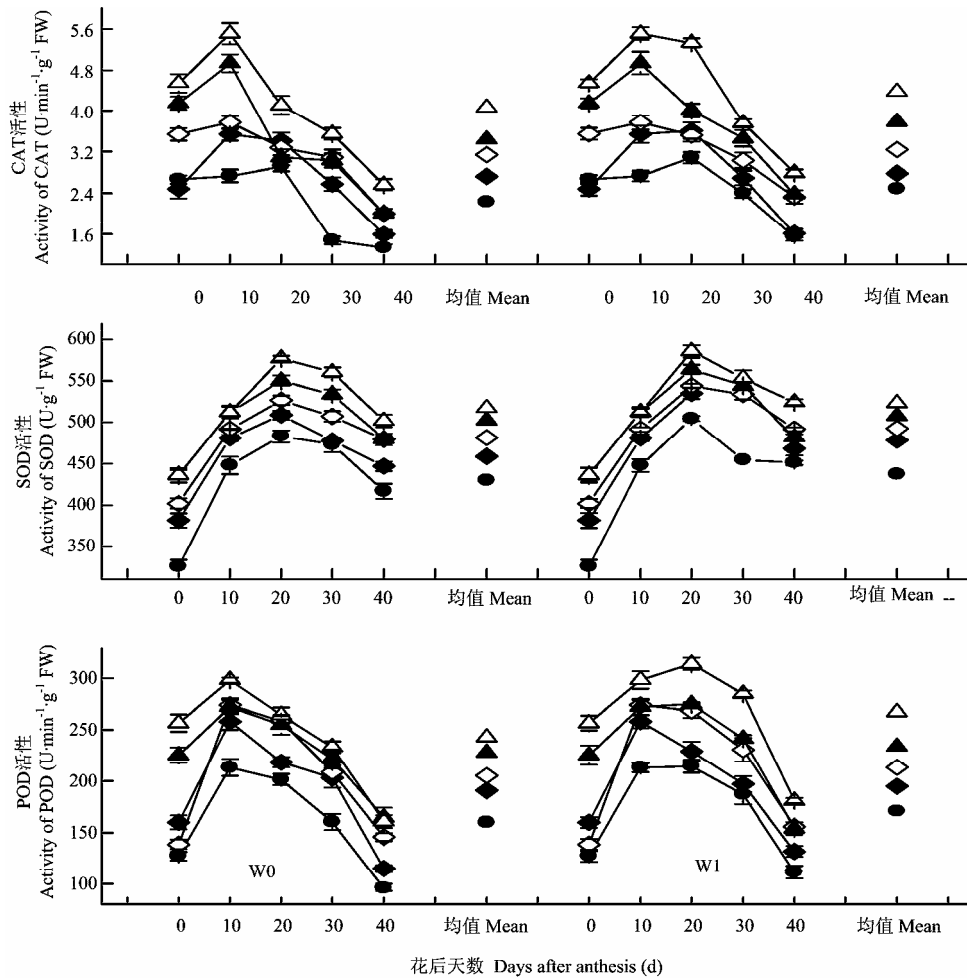


图3 不同处理对玉米穗位叶CAT、SOD和POD活性动态变化

Fig. 3 Dynamics of different treatments on activity of CAT, SOD, and POD in ear leaf of maize

包膜控释尿素氮素的缓慢释放利于后期玉米穗位叶维持较高的保护酶活性，延缓叶片衰老。同一类型肥料相比，施氮量增加时3种保护酶活性也显著增加。施氮条件下，灌水处理的3种保护酶活性均高于不灌水处理，表明灌水处理也利于玉米花后维持较高的3种保护酶活性。

2.4 不同处理对玉米穗位叶可溶性蛋白的影响

玉米穗位叶中可溶性蛋白主要是一些酶蛋白，RUBPCase 约占总可溶性蛋白质含量的50%，而且可溶性蛋白质含量的降低主要源于RuBPCase的减少，其含量可以反映酶总体水平的高低^[22]。随着玉米生育进程的推移，不同水分条件下施氮处理的玉米花后叶片中可溶性蛋白含量均显著降低（图4）。在成熟期，同一施氮量下包膜控释尿素处理的可溶性蛋白含量均显著高于常规尿素，可见，包膜控释尿素氮素的缓慢

释放利于后期维持较高的可溶性蛋白含量。同一类型肥料相比，可溶性蛋白含量随着施氮量增加而显著增加。施氮条件下，灌水处理的可溶性蛋白含量比不灌水平均高9.8%，表明灌水处理能维持花后较高的可溶性蛋白含量。

2.5 不同处理对玉米穗位叶MDA含量的影响

不同水分条件下，各施氮处理玉米穗位叶MDA含量随生育进程显著增高（图5）。在成熟期，同一施氮量下，包膜控释尿素处理MDA含量均低于常规尿素，可见，包膜控释尿素氮素的缓慢释放利于减缓MDA的累积，细胞膜系统结构和功能受伤害程度较轻，施氮量150 kgN·hm⁻²时尤为明显。同一类型肥料相比，MDA累积量随着施氮量的增加而显著降低。施氮条件下，灌水处理的MDA含量比不灌水平均低16.2%，表明灌水处理也有利于减缓MDA的累积。

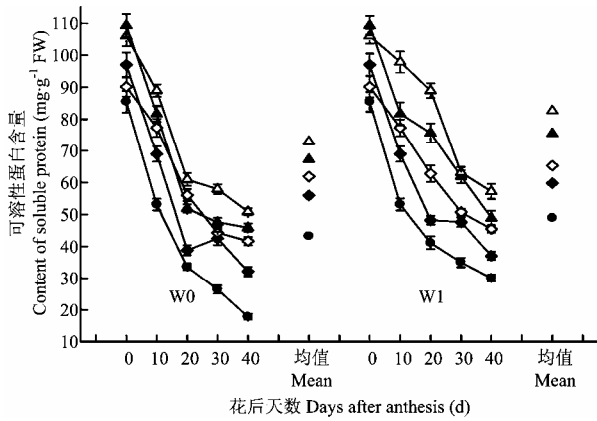


图 4 不同处理对玉米穗位叶可溶性蛋白含量动态变化

Fig. 4 Dynamics of different treatments on content of soluble protein in ear leaf of maize

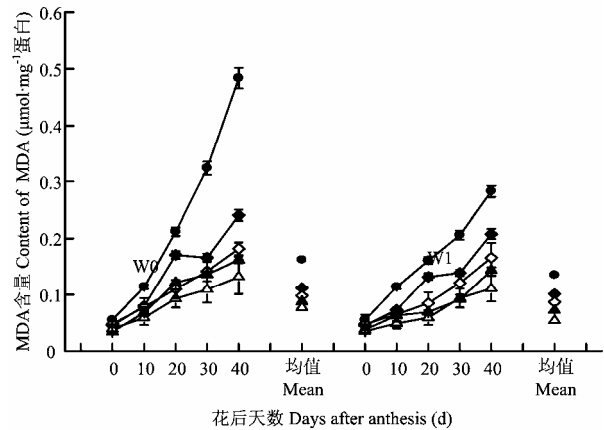


图 5 不同处理对玉米穗位叶 MDA 含量动态变化

Fig. 5 Dynamics of different treatments on content of MDA in ear leaf of maize

2.6 不同处理对玉米产量及经济效益的影响

土壤水分状况、尿素类型和用量对玉米产量有显著影响(表 1)。在相同的水分条件下,籽粒产量均表现为 CN2>N2>CN1>N1>N0,表明施氮量增加利于产量的提高,相同氮水平下包膜控释尿素比常规尿素增产效果更明显。同一类型肥料相比,籽粒产量随着施氮量增加而显著增加。灌水条件下常规尿素处理和包膜控释尿素处理的籽粒产量分别比不灌水平均高 11.4%和 8.9%,表明浇灌浆水可显著增产。

从千粒重看,在相同的水分条件下,施氮能显著提高玉米的千粒重(表 1)。同一肥料类型相比,千粒重随施氮量的增加而提高;同一施肥量相比,不同的肥料类型对千粒重的影响差异不显著。施氮条件下,灌水处理的穗粒数比不灌水平均高 3.5%。

土壤水分状况、尿素类型和用量对玉米穗粒数也有显著影响。在相同的水分条件下,施氮能显著提高玉米穗粒数,均表现为 CN2>N2>CN1>N1>N0。

表 1 不同处理玉米产量和经济效益差异

Table 1 Yield and economic benefit of maize in different treatments

处理 Treatment	穗粒数 Grain number per spike	千粒重 Weight per 1000 kernels (g)	公顷穗数 Spike number	干物质 Dry matter(kg·hm ⁻²)			投入比对照增加 Input increase than CK (yuan/hm)	效益比对照增加 Benefit increase than CK (yuan/hm)
				籽粒 Grain	秸秆 Straw	总和 Total		
W0N0	472e	306.47f	67085a	7680f	6947i	14627h	-	-
W0N1	535d	319.10de	67100a	8655e	7864g	16518g	310f	1327g
W0CN1	566c	324.00d	67138a	9482d	8664f	18145f	690d	2337e
W0N2	576c	333.70bc	67334a	9999c	9620d	19620d	620d	3277d
W0CN2	603b	331.83c	67349a	10734b	10485a	21220a	1380b	3751c
W1N0	511d	314.83e	67296a	8815e	7690h	16504g	200g	1706f
W1N1	600b	333.10bc	67139a	9909c	8635f	18545e	510e	3235d
W1CN1	609a	337.33b	67388a	10794b	9199e	19993c	890c	4340b
W1N2	610a	338.25b	67398a	10868b	9850c	20718b	820c	4535a
W1CN2	622a	346.27a	67400a	11215a	10052b	21267a	1580a	4358b

表中投入和收入数据由当年市场价计算而得,玉米 1.68 元/kg,普通尿素 1.90 元/kg,控释尿素 4.00 元/kg,灌水成本 200 元/hm²。同列数据后不同字母表示差异达 0.05 显著水平

Data of input and income in the table were calculated by the market prices, with maize 1.68 yuan/kg, normal urea 1.90 yuan/kg, controlled release urea 4.00 yuan/kg and irrigation cost 200 yuan/hm². Value with the different letters in the same column meant significant difference at 0.05 level

施氮条件下,包膜控释尿素处理的穗粒数均显著高于常规尿素处理。同一类型肥料相比,施氮量增加时穗粒数也显著增加。施氮条件下,灌水处理的穗粒数比不灌水平均高 7.1%。

由表 1 还可以看出,灌溉和施氮均显著提高玉米的经济效益。施氮量 $75 \text{ kgN}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $150 \text{ kgN}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时包膜控释尿素处理的经济效益比常规尿素分别平均高 46.3%、3.8%。同一类型肥料相比,施氮量增加时经济效益也显著增加。施氮条件下,灌水处理的经济效益比不灌水平均高 54.0%。在 W0 条件下,经济效益表现为 $\text{CN2} > \text{N2} > \text{CN1} > \text{N1} > \text{N0}$; 在 W1 条件下,经济效益则表现为 $\text{N2} > \text{CN2} > \text{CN1} > \text{N1} > \text{N0}$, 由于目前控释尿素价格是常规尿素的 2 倍多, CN2 尽管增产显著,但其经济效益低于 N2。

3 讨论

在玉米叶片衰老的过程中,净光合速率不断下降,活性氧清除酶 SOD、POD 和 CAT 活性下降,可溶性蛋白含量降低,丙二醛含量升高,从而引起蛋白质、核酸和脂类等生物大分子降解和生物膜脂的过氧化,导致叶片生理功能衰退^[3-4]。不同的氮肥种类和用量对作物光合功能和叶片衰老影响显著^[1,23]。本研究结果表明,在相同的水分条件下,增加施氮量可显著提高玉米光合速率,且包膜控释尿素 > 常规尿素。李潮海等^[2]研究表明增加施氮量也利于提高玉米净光合速率,与常规尿素相比,开花期施用包膜控释尿素处理的净光合速率略低,但花后净光合速率始终保持较高值。这一时期维持较高的光合速率并延长光合时间,可使玉米叶片有更多的光合产物积累。增施氮肥有利于延缓作物叶片衰老,可以改善活性氧清除酶的代谢合成^[12,24]。本研究发现,增加施氮量可以维持花后叶片中较高的活性氧清除酶 SOD、POD 和 CAT 的生理活性,提高叶片中可溶性蛋白的含量,降低叶片中 MDA 的积累。相同施氮量下包膜控释尿素处理玉米穗位叶净光合速率、活性氧清除酶 SOD、POD 和 CAT 的生理活性及可溶性蛋白含量均显著高于常规尿素,而 MDA 的含量却显著低于常规尿素,灌浆水可以显著提高这种效果。其原因在于包膜控释尿素前期释放较慢^[25],为了获得足够的养分与水分,玉米根冠比较大;而花后氮素供应较充足,根系相对数量较多、活力较强^[26],叶片含水量较高,有利于植物的生长发育^[27]。浇灌浆水后,土壤中的氮素向深层迁移量增多^[25,28],常规尿素前期的大量吸收和淋失造成花后表层

土壤氮素损失,导致植株根系周围出现氮亏缺,花后玉米氮素供需矛盾加重,不利于地上部干物质质量的积累和转移;而包膜控释尿素缓慢释放的特性减轻了淋洗作用,有利于缓解这一现象,更好的满足产量形成期对氮素的需求^[17,23]。所有这些都利于改善细胞内活性氧产生与清除之间的平衡关系,这是包膜控释尿素和灌溉明显延缓玉米叶片衰老和光合功能衰退的重要生理原因之一。

改善肥水条件是获得高产的有力措施^[26,29]。研究表明,水分状况、氮肥类型及用量对玉米产量构成因素与其对产量的影响具有一致性,均随施氮量的增加而增加,相同施氮量下包膜控释尿素处理显著高于常规尿素处理,而灌浆水可以显著提高这种效果。但从产量三因素看,这种增产效果更多地来源于穗粒数的增多。灌溉和施肥能够使玉米显著增产的原因之一是它们显著提高了玉米穗位叶净光合速率,并改善了玉米叶片细胞内活性氧产生与清除之间的平衡关系。如提高了叶片活性氧清除酶 SOD、POD 和 CAT 的生理活性和可溶性蛋白含量,降低了 MDA 的积累量。

与常规尿素相比,包膜控释尿素在提高氮素利用率、延缓玉米衰老和提高产量的同时,也可显著提高经济效益。目前包膜控释尿素的价格是常规尿素的 2 倍多,其价格还有较大的压缩空间。随着包膜控释尿素产量的增加和生产成本的降低,包膜控释尿素在玉米等作物上的广泛应用是化学肥料发展的重要趋势之一。

4 结论

与常规尿素相比,包膜控释尿素提高了玉米穗位叶活性氧清除酶 SOD、POD 和 CAT 的生理活性,增加了可溶性蛋白含量,降低了 MDA 的积累量,延缓叶片衰老和提高净光合速率,有利于高产。灌浆水也有利于改善玉米叶片细胞内活性氧产生与清除之间的平衡关系,延长了穗位叶功能期,显著提高了籽粒产量和经济效益。与常规尿素相比,包膜控释尿素与灌溉对玉米籽粒产量和经济效益的耦合效应更显著。随着包膜控释尿素产量的增加和成本的降低,它在玉米等粮食作物生产上将有着非常广阔的应用前景。

References

- [1] 何 萍, 金继运. 氮钾营养对春玉米叶片衰老过程中激素变化与活性氧代谢的影响. 植物营养与肥料学报, 1999, 5(4): 289-296.

He P, Jin J Y. Effect of N and K nutrition on changes of endogenous

- hormone and metabolism of active oxygen during leaf senescence in spring maize. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1999, 5(4): 289-296. (in Chinese)
- [2] 李潮海, 刘奎, 周苏玫, 栾丽敏. 不同施肥条件下夏玉米光合对生理生态因子的响应. *作物学报*, 2002, 28(2): 265-269.
- Li C H, Liu K, Zhou S M, Luan L M. Response of photosynthesis to eco-physiological factors of summer maize on different fertilizer amounts. *Acta Agronomica Sinica*, 2002, 28(2): 265-269. (in Chinese)
- [3] 王宝山. 生物自由基与植物膜伤害. *植物生理学通讯*, 1988, (2): 12-16.
- Wang B S. Biological free radicals and membrane damage of plants. *Plant Physiology Communications*, 1988, (2): 12-16. (in Chinese)
- [4] 刘道宏. 植物叶片的衰老. *植物生理学通讯*, 1983, (2): 14-19.
- Liu D H. The senescence of plant leaves. *Plant Physiology Communications*, 1983, (2): 14-19. (in Chinese)
- [5] Foyer C H, Descourvières P, Kunert K J. Protection against oxygen radicals: an important defence mechanism studied in transgenic plants. *Plant Cell and Environment*, 1994, 17: 507-523.
- [6] Bowler C, van Montague M, Inze D. Superoxide dismutase and stress tolerance. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1992, 43: 83-116.
- [7] 林植芳, 李双顺, 林桂珠, 孙谷畴, 郭俊彦. 水稻叶片的衰老与超氧化物歧化酶活性及脂质过氧化作用的关系. *植物学报*, 1984, 26(6): 605-615.
- Lin Z F, Li S S, Lin G Z, Sun G C, Guo J Y. Superoxide dismutase activity and lipid peroxidation in relation to senescence of rice leaves. *Journal of Integrative Plant Biology*, 1984, 26(6): 605-615. (in Chinese)
- [8] 郝玉兰, 潘金豹, 张秋芝, 李爱萍. 不同生育期水分胁迫对玉米叶片 CAT 和 MDA 的影响. *北京农学院学报*, 2003, 18(3): 178-180.
- Hao Y L, Pan J B, Zhang Q Z, Li A P. The effect of water stress on CAT and MDA at different growth stages in maize seedling. *Journal of Beijing Agricultural College*, 2003, 18(3): 178-180. (in Chinese)
- [9] 刘祖贵, 陈金平, 段爱旺, 孟兆江, 张寄阳, 刘战东. 不同土壤水分处理对夏玉米叶片光合等生理特性的影响. *干旱地区农业研究*, 2006, 24(1): 90-95.
- Liu Z G, Chen J P, Duan A W, Meng Z J, Zhang J Y, Liu Z D. Effects of different soil moisture treatments on physiological characteristics of summer maize leaves. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2006, 24(1): 90-95. (in Chinese)
- [10] 杨德光, 沈秀瑛, 赵天宏, 马秀芳. 水分胁迫下玉米叶片光合的活性氧限制. *玉米科学*, 2000, 8(3): 59-61.
- Yang D G, Shen X Y, Zhao T H, Ma X F. The photosynthetic active oxygen's limitation of maize leaves under water stress. *Journal of Maize Sciences*, 2000, 8(3): 59-61. (in Chinese)
- [11] 杨淑慎, 高俊凤, 李学俊. 高等植物叶片的衰老. *西北植物学报*, 2001, 21(6): 1271-1277.
- Yang S S, Gao J F, Li X J. Leaf senescence in higher plant. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2001, 21(6): 1271-1277. (in Chinese)
- [12] 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.
- Zhan X M, Han X R, Yang J F, Wang S, Gao M, Zhao L Y. Effect of different fertilizer supply of maize on protective enzyme activities and lipid peroxidation of leaves in latter stage. *Journal of Maize Sciences*, 2007, 15(1): 123-127. (in Chinese)
- [13] Zand-Parsa S, Sepaskhah A R, Ronaghi A. Development and evaluation of integrated water and nitrogen model for maize. *Agricultural Water Management*, 2006, 81: 227-256.
- [14] Kirda C, Topcu S, Kaman H, Ulger A C, Yazici A, Cetin M, Derici M R. Grain yield response and N-fertilizer recovery of maize under deficit irrigation. *Field Crops Research*, 2005, 93: 132-141.
- [15] 张卫星, 赵致, 柏光晓, 付芳婧, 曹绍书. 不同玉米杂交种对水分和氮胁迫的响应及其抗逆性. *中国农业科学*, 2007, 40(7): 1361-1370.
- Zhang W X, Zhao Z, Bai G X, Fu F J, Cao S S. Response on water stress and low nitrogen in different maize hybrid varieties and evaluation for their adversity-resistance. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(7): 1361-1370. (in Chinese)
- [16] 孙克君, 毛小云, 卢其明, 廖宗文. 几种控释氮肥的饲料玉米肥效及其生理效应研究. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(3): 345-351.
- Sun K J, Mao X Y, Lu Q M, Liao Z W. Manurial effect of several controlled-release N fertilizers (CRNFs) on forage maize and its physiological effects. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(3): 345-351. (in Chinese)
- [17] 邵国庆, 李增嘉, 宁堂原, 张民, 焦念元, 韩宾, 白美, 李洪杰. 灌溉和尿素类型对玉米氮素利用及产量和品质的影响. *中国农业科学*, 2008, 41(11): 3672-3678.
- Shao G Q, Li Z J, Ning T Y, Zhang M, Jiao N Y, Han B, Bai M, Li H J. Effects of irrigation and urea types on N utilization, yield and quality of maize. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(11): 3672-3678. (in Chinese)
- [18] 王爱国, 罗广华, 邵从本, 吴淑君, 郭俊彦. 大豆种子超氧化物歧化酶的研究. *植物生理学报*, 1983, 9(1): 77-84.
- Wang A G, Luo G H, Shao C B, Wu S J, Guo J Y. A study on the

- superoxide dismutase of soybean seeds. *Acta Phytophysiologica Sinica*, 1983, 9(1): 77-84. (in Chinese)
- [19] Xue Y F, Liu L, Liu Z P, Mehta S K, Zhao G M. Protective role of Ca against NaCl toxicity in Jerusalem artichoke by up-regulation of antioxidant enzymes. *Pedosphere*, 2008, 18(6): 766-774.
- [20] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导(第二版). 广州: 华南理工大学出版社, 2006: 72-73.
Chen J X, Wang X F. *Test Guide of Laboratory Plant Physiology* (2nd ed.). Guangzhou: South China University of Technology Press, 2006: 72-73. (in Chinese)
- [21] Bradford M M. A rapid and sensitive method for the determination of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 1976, 72: 248-254.
- [22] 江晓东, 迟淑筠, 李增嘉, 宁堂原, 王 芸, 邵国庆. 少免耕模式对小麦花后旗叶衰老和产量的影响. *农业工程学报*, 2008, 24(4): 55-58.
Jiang X D, Chi S Y, Li Z J, Ning T Y, Wang Y, Shao G Q. Effects of minimum tillage and no-tillage patterns on flag leaf senescence after anthesis and yield of winter wheat. *Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(4): 55-58. (in Chinese)
- [23] 聂 军, 郑圣先, 戴平安, 肖 剑, 易国英. 控释氮肥调控水稻光合功能和叶片衰老的生理基础. *中国水稻科学*, 2005, 19(3): 255-261.
Nie J, Zheng S X, Dai P A, Xiao J, Yi G Y. Regulation of senescence and photosynthetic function of rice leaves by controlled release nitrogen fertilize. *Chinese Journal of Rice Science*, 2005, 19(3): 255-261. (in Chinese)
- [24] 赵长星, 马东辉, 王月福, 林 琪. 施氮量和花后土壤含水量对小麦旗叶衰老及粒重的影响. *应用生态学报*, 2008, 19(11): 2388-2393.
Zhao C X, Ma D H, Wang Y F, Lin Q. Effects of nitrogen application rate and post-anthesis soil moisture content on the flag leaf senescence and kernel weight of wheat. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(11): 2388-2393. (in Chinese)
- [25] 张 民, 史衍玺, 杨守祥, 杨越超. 控释和缓释肥的研究现状与进展. *化肥工业*, 2001, 28(5): 27-30, 63.
Zhang M, Shi Y X, Yang S X, Yang Y C. Status quo of study of controlled-release and slow-release fertilizers and progress made in this respect. *Journal of Chemical Fertilizer Industry*, 2001, 28(5): 27-30, 63. (in Chinese)
- [26] 邵国庆, 李增嘉, 宁堂原, 张 民, 江晓东, 王 芸, 赵建波, 吕美蓉, 赵 杰. 不同水分条件下常规尿素和控释尿素对玉米根冠生长及产量的影响. *作物学报*, 2009, 35(1): 118-123.
Shao G Q, Li Z J, Ning T Y, Zhang M, Jiang X D, Wang Y, Zhao J B, Lv M R, Zhao J. Effects of normal urea and release-controlled urea on root and shoot growth and yield of maize in different water conditions. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(1): 118-123. (in Chinese)
- [27] 关军锋, 刘海龙, 李广敏. 分根灌水对玉米根系活力及叶片含水量的影响. *中国生态农业学报*, 2004, 12(1): 133-135.
Guan J F, Liu H L, Li G M. Effects of roots-divided irrigation on root vitality and leave water content in maize. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2004, 12(1): 133-135. (in Chinese)
- [28] 周顺利, 张福锁, 王兴仁. 土壤硝态氮时空变异与土壤氮素表观盈亏 II. 夏玉米. *生态学报*, 2002, 22(1): 48-53.
Zhou S L, Zhang F S, Wang X R. The spatio-temporal variations of soil NO₃⁻-N and apparent budget of soil nitrogen II. summer maize. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(1): 48-53. (in Chinese)
- [29] Ogola J B O, Wheeler T R, Harris P M. Effects of nitrogen and irrigation on water use of maize crops. *Field Crops Research*, 2002, 78: 105-117.

(责任编辑 郭银巧)