

缓释与普通尿素分层配施对土壤 氮素和玉米生长的影响

王玉凤^{1,2}, 武 鹏^{1,2,3,4}, 李 庆^{1,2}, 张 鹏^{3,4},
贾志宽^{3,4}, 薛盈文^{1,2}, 杨克军^{1,2}

(1.黑龙江八一农垦大学农学院, 黑龙江 大庆 163319; 2.黑龙江省现代农业栽培技术与作物种质改良重点实验室, 黑龙江 大庆 163319;
3.西北农林科技大学农学院, 陕西 杨凌 712100 ;4.中国旱区节水农业研究院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:通过 2 a 大田随机区组试验,探究缓释与普通尿素分层配施对土壤氮素含量、玉米根叶衰老及产量的影响机理。试验设置不施氮肥(CK)、普通尿素 1 次施肥 PU1 (5~10 cm 土层)、普通尿素传统 2 次施肥 PU2 (5~10 cm 土层,60%种肥+40%追肥)、普通尿素 1 次分层施肥 PU3 (5~10 cm 土层 20%N+15~20 cm 土层 30%N+25~30 cm 土层 50%N)、不同土层深度缓释与普通尿素配施 PCU1~PCU4 [均为 5~10 cm 土层 20%N(普通尿素)+15~20 cm 土层 30%N(配施)+25~30 cm 土层 50%N(配施)],其中 PCU1~PCU4 的 15~20 cm 和 25~30 cm 土层 PCU:PU 分别为 3:7、3:7、5:5、5:5 和 3:7、5:5、5:5、3:7]共 8 个处理。结果表明,与 PU1、PU2、PU3 相比,缓释与普通尿素分层配施处理在玉米生育后期(吐丝期和灌浆期)土壤中 NO_3^- -N 含量提高了 4.21%~133.44%, NH_4^+ -N 含量提高了 17.09%~72.95%;叶片 SOD、POD、CAT、可溶性蛋白分别提高了 9.22%~26.75%、7.72%~23.35%、7.66%~22.96%、11.67%~32.98%,MDA 降低了 2.34%~37.53%;根系 SOD、POD、CAT、可溶性蛋白分别提高了 7.93%~22.75%、19.09%~42.13%、9.71%~60.98%、12.42%~103.57%,MDA 降低了 3.01%~31.6%。缓释与普通尿素分层配施玉米产量在 2017 年和 2018 年比其它处理分别提高 2.32%~26.16%和 1.32%~22.36%,经济效益增加 1.67%~31.84%和 0.33%~27.49%,各处理中 PCU4 处理产量最高,2017 年和 2018 年分别为 13 899.08 kg·hm⁻²和 12 439.35 kg·hm⁻²,经济效益分别为 17 022.25 元·hm⁻²和 14 832.65 元·hm⁻²。综合来看 PCU4 处理是最佳的缓释尿素施用方式。

关键词:玉米;缓释与普通尿素;分层配施;土壤氮素;生理指标

中图分类号:S513;S143.1 **文献标志码:**A

Combined effects of slow-release and common urea application at different depths on soil nitrogen and maize growth

WANG Yufeng^{1,2}, WU Peng^{1,2,3,4}, LI Qing^{1,2}, ZHANG Peng^{3,4},
JIA Zhikuan^{3,4}, XUE Yingwen^{1,2}, YANG Kejun^{1,2}

(1. College of Agriculture, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang 163319, China;

2. Laboratory of Modern Agricultural Cultivation and Crop Germplasm Improvement of Heilongjiang Province, Daqing, Heilongjiang 163319, China;

3. College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

4. The Chinese Institute of Water-Saving Agriculture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: A two year field experiment was carried out to determine the mechanism of increasing the grain yield of maize by combining the slow-release with the common urea by affecting the soil nitrogen content and delaying the senescence of leaf and root. The experiment consisted of eight treatments including no nitrogen fertilizer application (CK), common urea applied at a depth of 5~10 cm soil layer (PU1), common urea applied at a depth

收稿日期:2019-06-14

修回日期:2020-01-02

基金项目:国家重点研发计划(2018YFD0300101);黑龙江省现代农业产业技术协同创新体系;黑龙江八一农垦大学三横三纵支持计划(TDJH201902)

作者简介:王玉凤(1978-),女,副教授,主要从事玉米高产栽培研究。E-mail:Wangyf0918@163.com

通信作者:杨克军(1968-),男,教授,主要从事玉米高产栽培与作物逆境生理生态研究。E-mail:byndykj@163.com

of 5~10 cm soil layer, 60% seed fertilizer + 40% topdressing (PU2); 20% common urea at a depth of 5~10 cm soil layer, 30% common urea at 15~20 cm soil depth, 50% common urea at 25~30 cm soil depth (PU3); 20% total nitrogen application rate at 5~10 cm soil depth, 30% total nitrogen application rate at 15~20 cm soil depth, and 50% total nitrogen application rate at 25~30 cm soil depth (PCU1~PCU4). The N fertilizer at 5~10 cm was common urea but at 15~20 cm and 25~30 cm, it was a combination of PCU and PU at ratios of 3 : 7 and 3 : 7 in PCU1; PCU2 was as PCU1 but the ratio of PCU and PU was 5 : 5 at 15~20 cm and 5 : 5 at 25~30 cm; in PCU3, the ratio of PCU and PU was 3 : 7 at 15~20 cm and 5 : 5 at 25~30 cm; in PCU4, the ratio of PCU and PU was 5 : 5 at 15~20 cm and 3 : 7 at 25~30 cm. The results suggested that compared with the PU1, PU2, and PU3, the slow-release combined with common urea increased the soil NO_3^- -N and NH_4^+ -N contents by 4.21%~133.44% and 17.09%~72.95%, respectively, in the later maize growth stages (silking and filling stages). The SOD, POD, CAT activity, and soluble protein content of ear leaf increased by 9.22%~26.75%, 7.72%~23.35%, 7.66%~22.96%, and 11.67%~32.98%, respectively. The MDA decreased by 2.34%~37.53% of leaf. The SOD, POD, CAT, and soluble protein contents of root increased by 7.93%~22.75%, 19.09%~42.13%, 9.71%~60.98%, 12.42%~103.57%, and MDA decreased by 3.01%~31.6% of root. Compared with PU1, PU2, and PU3, the maize yield increased by 2.32%~26.16% and 1.32%~22.36% in slow-release combined with common urea treatment, and the economic profit increased by 1.67%~31.84% and 0.33%~27.49%, and PCU4 had the highest yield of 13 899 kg · hm⁻² and 12 439 kg · hm⁻², respectively, in 2017 and 2018, and the profit were 17 022.25 yuan · hm⁻² and 14 832.65 yuan · hm⁻². The results suggested that the PCU4 treatment was the most effective treatment for maize.

Keywords: maize; slow-release and common urea; application at different depths soil; soil nitrogen; physiological index

玉米作为我国第一大粮-经-饲作物在我国粮食生产中占据重要地位,研究表明我国玉米增产潜力巨大;施用氮肥是提高玉米产量的有效方式^[1-6],但是实际生产中农户过量施氮带来一系列环境污染问题^[7]。玉米从拔节期开始进入旺盛生长阶段,根系和穗位叶不断发育,花后叶片和根系的衰老与产量形成同步进行,此时保证充足的氮素供应可延缓根系和叶片衰老,对于产量形成意义重大^[8-9]。缓释尿素作为一种长效尿素通过“前控后保”作用来保证作物整个生育时期对氮素的需求,现在已经成为轻简化一次施肥的重要发展方向。因此探究合理高效的缓释尿素施用方式来延缓叶片和根系衰老,提高叶片光合特性,促进光合产物形成是玉米高产生理的重要课题之一。前人研究表明,植物生育后期叶片将营养运送到籽粒中时会产生代谢与营养胁迫的矛盾,细胞间活性氧产生与清除之间的平衡遭到破坏,积累的活性氧对细胞造成伤害,促使细胞膜脂过氧化,进而引起叶片衰老^[10]。植物体内 SOD、POD 和 CAT 具有清除氧自由基的作用^[11-12],是重要的保护酶;MDA 是膜脂氧化的主要产物之一,其含量高低代表膜脂过氧化水平,其含量升高表示植株衰老^[13-14];可溶性蛋白含量也能反映植株衰老情况^[15],所以 SOD、POD、CAT、MDA

和可溶性蛋白可用来作为代表叶片和根系衰老的生理生化指标。耿计彪等^[16]研究发现缓释与普通尿素以不同比例配置后一次基施能显著提高叶片光合速率、SOD、POD 活性和可溶性蛋白含量,降低 MDA 含量,延缓叶片衰老。李广浩等^[17-18]通过缓释尿素水氮耦合试验表明缓释尿素水氮耦合能够提高玉米花后穗位叶功能,促进光合产物的产生。前人主要是将缓释尿素与普通尿素以不同比例配施一次基施来探究其对玉米生理特性的影响,关于分层施肥报道较少,本研究在不同深度土层将缓释尿素与普通尿素以不同比例配施作为基肥,探究其对玉米生理特性的影响,以期找到更加适宜、高效的施肥方式来延缓玉米衰老和促进增产。

1 材料与方法

1.1 试验条件

试验于 2017—2018 年在黑龙江八一农垦大学现代农业栽培技术与作物种质改良重点实验室试验基地(125°11'E,46°37'N)进行,该基地位于松嫩平原,全年降水偏少,属于半干旱区。玉米生长期多年日平均气温 4.2℃,降雨量 427.5 mm,蒸发量 1 635 mm。供试土壤为盐化草甸土,基础肥力见表 1。供试玉米品种为“庆单 3 号”,供试肥料为树脂包

表 1 供试土壤基础肥力
Table 1 The fertility of studied soil

土层深度/cm Soil depth	有机质/(g·kg ⁻¹) Organic matter	全氮/(g·kg ⁻¹) Total N	碱解氮/(mg·kg ⁻¹) Available N	速效磷/(mg·kg ⁻¹) Available P	速效钾/(mg·kg ⁻¹) Available K	pH
0~10	28.12	1.16	114.56	18.21	106.16	8.09
10~20	26.48	1.14	112.47	18.05	105.48	7.98
20~30	26.35	1.13	105.33	17.37	98.79	7.92

膜尿素 (PCU, N 45%, 山东茂施生态肥料有限公司生产), 普通尿素 (PU, N 46%, 中国石油天然气股份有限公司-昆仑尿素), 硫酸钾 (K₂O 50%, 国投新疆罗布泊钾盐有限公司), 过磷酸钙 (P₂O₅ 12%, 中化化肥有限公司生产)。

1.2 试验设计

本研究为大田试验, 采用随机区组设计, 以不施氮肥为空白对照 (CK), 设置 7 个氮肥处理, 分别为: PU1: 普通尿素一次性施入, 施肥深度为种子下方 5~10 cm (当地部分农户的“一炮轰”施肥方式); PU2: 普通尿素分两次施入, 基追比为 6: 4, 施肥深度均为种子下方 5~10 cm (当地部分农户机械施肥加机械追肥施肥方式); PU3: 普通尿素在种子下方 5~10、15~20 cm 和 25~30 cm 分别一次性施纯氮的 20%、30% 和 50%; PCU1~PCU4 为缓释尿素与普通尿素分层配施处理, 种子下方 5~10、15~20、25~30 cm 分别施纯氮的 20%、30% 和 50%, 其中 5~10 cm 均施普通尿素, 15~20 cm 和 25~30 cm 土层分别施用不同配比的缓释尿素和普通尿素, PCU1 在 15~20 cm 和 25~30 cm 缓释尿素与普通尿素配施比例均为 3: 7; PCU2 均为 5: 5; PCU3 在 15~20 cm 配施比例为 3: 7, 25~30 cm 为 5: 5; PCU4 在 15~25 cm 配施比例为 5: 5, 25~30 cm 为 3: 7, 共 8 个处理。每个处理 3 次重复, 每个小区面积 52 m² (10 m 行长, 每小区 8 行, 行距 0.65 m)。各处理统一在种子下方 5~10 cm 基施磷肥 (P₂O₅ 120 kg·hm⁻²) 和钾肥 (K₂O 90 kg·hm⁻²), 与此层尿素同时一次施入。各处理氮肥用量均为 220 kg·hm⁻², 施肥方式为人工开沟, 每施入一层肥料后人工覆一层土, 最后播种、覆土和人工踩压。播种时间为 2017 年 5 月 9 日和 2018 年 4 月 28 日, 种植密度均为 75 000 株·hm⁻², 田间管理同当地大田生产。由于数据量较大, 且 2017 年和 2018 年数据趋势相同, 因此除产量和经济效益外其它数据取 2 a 的平均值进行分析计算。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 土样采集与测定 整地前取 0~30 cm 土层土壤, 按常规法测定土壤基本理化性质^[19-21]。同时在玉米生育吐丝期和灌浆期用五点取样法取玉米垄

上 2 株玉米之间地下 0~30 cm 土样, 带回实验室后冷藏, 采用紫外分光光度法测定土壤硝态氮含量^[19], KCl 浸提—靛酚蓝比色法测定铵态氮含量^[19]。

1.3.2 叶片和根系酶活性的测定 在玉米拔节期、吐丝期和灌浆期每个小区选取长势均匀一致的 3 株植株, 剪下穗位叶迅速用塑封袋密封放入冰盒, 带回实验室放入-80℃冰柜冷藏以备测定; 砍下地上部分植株后取 0~30 cm 根系, 迅速用冰盒带回实验室在水龙头下冲洗干净后放入-80℃冰柜冷藏备用。SOD 活性采用氮蓝四唑 (NBT) 光还原法^[22]测定, POD 活性采用愈创木酚法测定^[23], CAT 活性采用紫外吸收法测定^[24], MDA 含量测定采用硫代巴比妥酸比色法^[25], 可溶性蛋白含量测定采用考马斯亮蓝法^[26]。

1.3.3 穗位叶光合特性的测定 在玉米拔节期、吐丝期和灌浆期选取晴天的 9: 30~12: 00 使用 Li-6400 便携式光合仪 (Li-Cor, Inc, 美国), 在各小区选取 3 株生育进程一致、具有代表性、照光均匀的植株 (穗位叶完全展开前选取顶部第 1 片完全展开叶, 穗位叶完全展开后选取穗位叶, 且避开叶脉) 循环测定自然光源下叶片蒸腾速率 (*Tr*)、净光合速率 (*Pn*)、胞间 CO₂ 浓度 (*Ci*)、气孔导度 (*Gs*)。

1.3.4 籽粒产量及其构成因素的测定 玉米成熟期, 收获各小区中间两垄连续 5 m 长的所有果穗, 统计有效穗数, 计算平均穗重, 选取具代表性的 20 个果穗, 进行室内考种, 记录穗粒数及百粒重, 计算 14% 含水率下的玉米产量。

1.4 数据处理与分析

数据处理及作图采用软件 Excel 2003 和 Origin 2018, 方差分析采用统计软件 DPS 7.05, 多重比较采用 LSD 检验法。

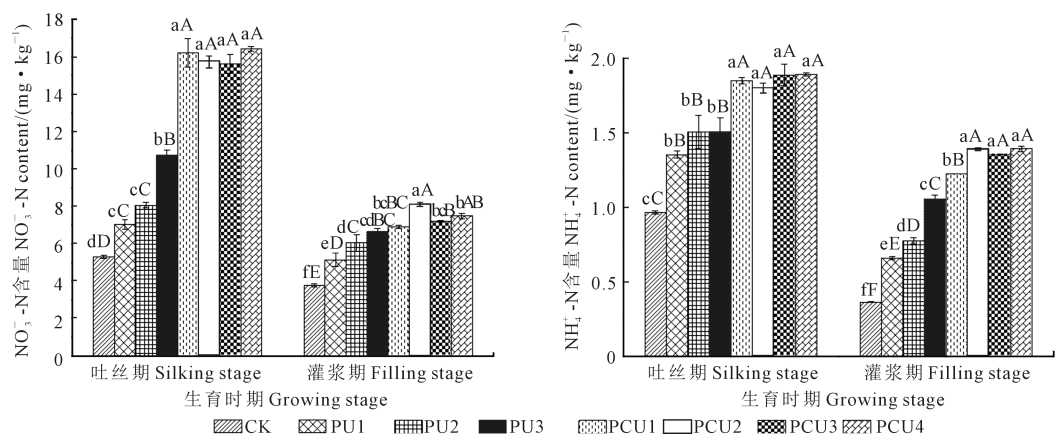
2 结果与分析

2.1 缓释与普通尿素分层配施对土壤氮素含量的影响

如图 1 所示, 施氮显著提高了吐丝期和灌浆期土壤的 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 含量。与普通尿素一次施肥 PU1、普通尿素传统施肥 PU2 及普通尿素分层施肥 PU3 相比, 缓释与普通尿素分层配施处理的

NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 含量均显著增加,其中灌浆期和成熟期的 NO_3^- -N 含量分别增加 4.91~9.38 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 0.27~3.00 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,提高了 45.86%~133.44%和 4.21%~58.25%; NH_4^+ -N 含量增加了 0.30~0.54 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 0.17~0.72 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,提高了 19.76%~39.76%和 17.09%~72.95%。与 PU1 和 PU2 相比,

PU3 处理的 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 含量也显著增加(吐丝期的 NH_4^+ -N 除外), NO_3^- -N 含量在吐丝期和灌浆期增加 2.65~3.68 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,提高 32.91%~52.26%; NH_4^+ -N 含量灌浆期增加 0.27~0.39 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,提高 35.48%~59.05%。灌浆期和成熟期 PCU2 的 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 均最高,分别为 8.15 和 1.39 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。



注:不同小、大写字母分别表示 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平下差异显著,下同。
Note: Different lowercase and majuscule letters indicate significant difference at $P<0.05$ and $P<0.01$ probability levels. The same below.

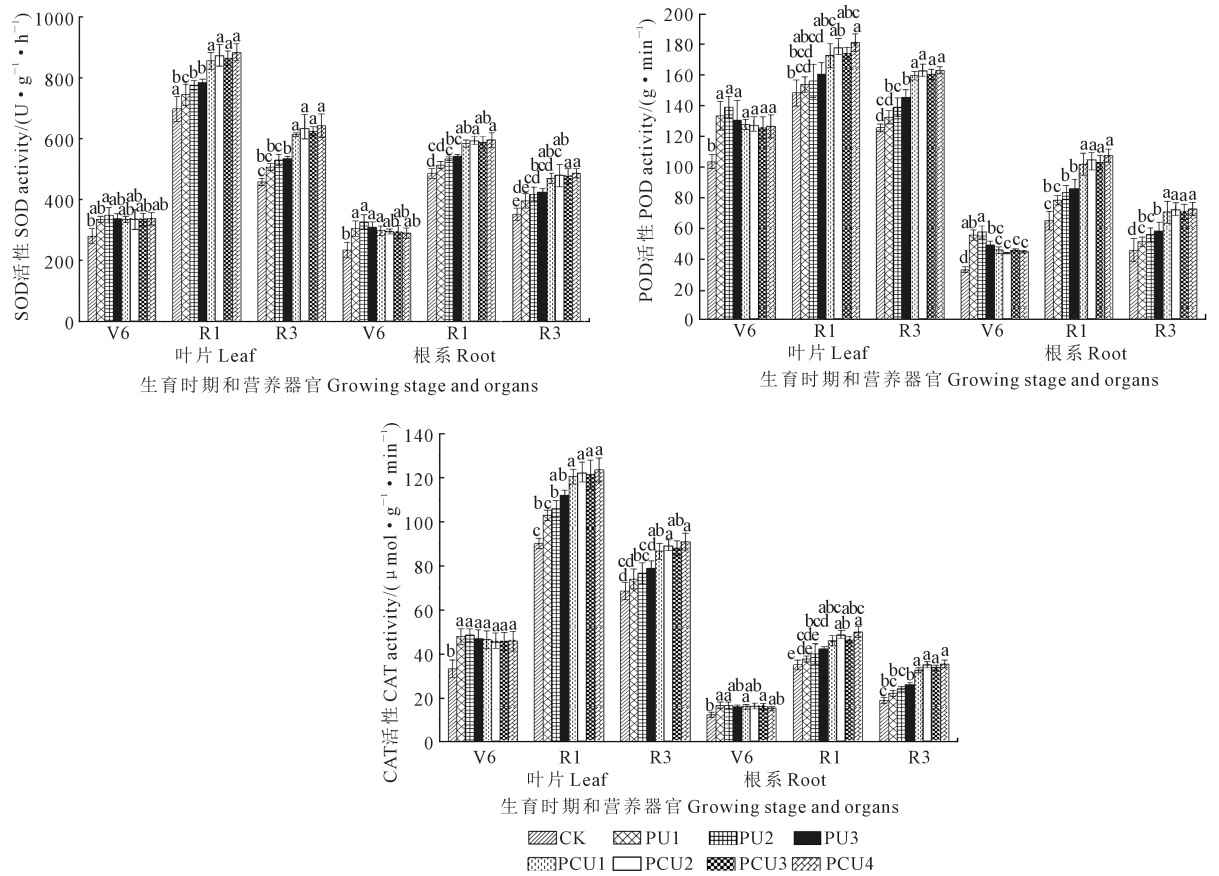
图 1 缓释与普通尿素分层配施对土壤氮素含量的影响
Fig.1 Effects of combined application of slow-release with common urea at different depths on soil nitrogen content

2.2 缓释与普通尿素分层配施对玉米根系及叶片衰老的影响

2.2.1 缓释与普通尿素分层配施对玉米根系及叶片保护酶活性的影响 如图 2 所示,施肥显著影响玉米根系和穗位叶的 3 种保护酶(SOD、POD、CAT)活性。整体来看,同一生育时期穗位叶的保护酶活性均高于根系,随着生育时期的推进穗位叶和根系保护酶活性均呈现先升高后降低的变化趋势,在吐丝期活性最高。拔节期,除 CK 处理的穗位叶和根系活性显著低于其它处理外,各施氮处理间无显著差异。吐丝期和灌浆期,缓释与普通尿素分层配施处理之间 SOD、POD 和 CAT 活性无明显差异,各处理中 PCU4 的 SOD、POD、CAT 活性均最高;吐丝期,PCU4 处理穗位叶和根系的 SOD 活性较 PU1、PU2 和 PU3 提高了 9.22%~18.68%和 7.93%~16.14%,POD 提高了 7.72%~17.91%和 19.09%~37.44%,CAT 提高了 7.66%~19.99%和 9.71%~32.76%;灌浆期,PCU4 处理穗位叶和根系 SOD 活性较 PU1、PU2 和 PU3 提高了 14.85%~26.75%和 11.39%~22.75%,POD 提高了 9.95%~23.35%和 22.16%~42.13%,CAT 提高了 10.02%~22.96%和 26.59%~60.98%。

2.2.2 缓释与普通尿素分层配施对玉米根系及叶片可溶性蛋白的影响 从图 3 可以看出,在生育期内叶片的可溶性蛋白含量高于根系,叶片可溶性蛋白含量呈先升高后降低趋势,根系可溶性蛋白含量则不断减少。拔节期除 CK 外各处理间可溶性蛋白含量无显著差异;吐丝期和灌浆期 PCU1~PCU4 间可溶性蛋白含量无显著差异但是均高于其它施氮处理,叶片可溶性蛋白含量较 PU1、PU2、PU3 在吐丝期和灌浆期分别提高了 16.25%~30.83%和 11.67%~32.98%,根系可溶性蛋白含量分别提高了 12.42%~45.97%和 40.54%~103.57%。

2.2.3 缓释与普通尿素分层配施对玉米根系及叶片 MDA 含量的影响 从图 4 可以看出,随着生育时期推进,叶片和根系的 MDA 含量不断增加且叶片高于根系。拔节期,叶片 CK 处理 MDA 含量显著高于其它处理,根系所有处理间无显著差异;吐丝期和灌浆期施氮处理的 MDA 含量低于对照 CK,PCU1~PCU4 处理的 MDA 含量低于 PU1、PU2、PU3 处理,叶片 MDA 含量在吐丝期和灌浆期分别降低了 2.37%~17.30%和 8.23%~37.53%,根系分别降低了 3.01%~22.73%和 6.66%~31.60%。叶片和根系中,PCU4 处理的 MDA 含量均是所有处理中最低且显著低于 PU1、PU2、PU3 处理。



注: V6:拔节期; R1:吐丝期; R3:灌浆期。下同。
Note: V6: Jointing stage; R1: Silking stage; R3: Filling stage. The same below.

图 2 缓释与普通尿素分层配施对玉米根系及叶片 SOD、POD 和 CAT 活性的影响
Fig.2 Effects of combined application of slow-release with common urea at different depths on SOD, POD and CAT activities of maize roots and leaves

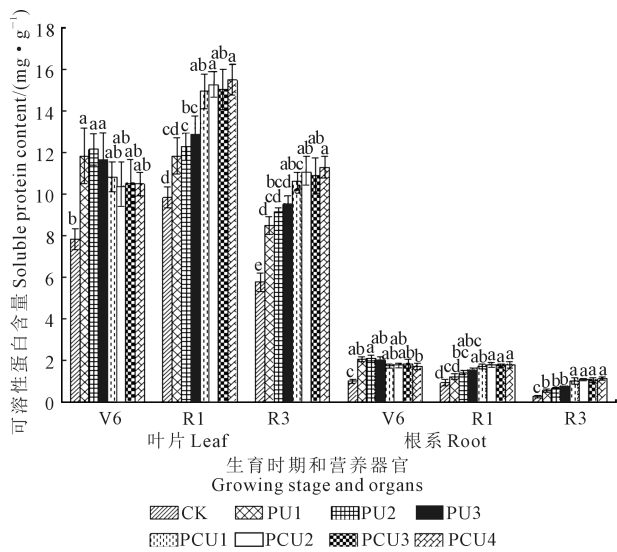


图 3 缓释与普通尿素分层配施对玉米根系及叶片可溶性蛋白的影响

Fig.3 Effects of combined application of slow-release with common urea at different depths on soluble protein content in maize roots and leaves

2.3 缓释与普通尿素分层配施对玉米穗位叶光合特性的影响

2.3.1 缓释与普通尿素分层配施对玉米穗位叶净光合速率的影响 各处理叶片的 P_n 均表现为先升高后降低(表 2),吐丝期达到峰值。拔节期除 CK 外其它处理间无显著差异,其中 PU1 处理 P_n 最高为 $38.64 \mu mol CO_2 \cdot (m^2 \cdot s)^{-1}$;吐丝期、灌浆期、成熟期缓释与普通尿素分层配施基施处理 P_n 均高于其它处理,分别较 PU1、PU2 和 PU3 提高 5.10% ~ 8.73%, 7.35% ~ 36.37% 和 12.92% ~ 40.63%, PCU4 最高分别为 $44.97, 6.81 \mu mol \cdot (m^2 \cdot s)^{-1}$ 和 $15.68 \mu mol \cdot (m^2 \cdot s)^{-1}$ 。

随生育时期推进玉米叶片 T_r 呈先升高后降低变化,各处理叶片 T_r 在吐丝期达到峰值。拔节期处理 PU1、PU2 和 PU3 间无显著差异,但比 PCU1、PCU2、PCU3、PCU4 高 9.37% ~ 20.51%,其中 PU1 最高为 $5.64 mmol \cdot (m^2 \cdot s)^{-1}$;吐丝期除 PU1 外其它处理间无显著差异,PCU1、PCU2、PCU3 和 PCU4 比 PU1、PU2、PU3 处理提高 14.29% ~ 24.72%;灌浆期和

表 2 缓释与普通尿素分层配施对玉米穗位叶光合特性的影响
Table 2 Effects of combined application of slow-release with common urea at different depths on the photosynthetic characteristics of ear leaf in maize

处理 Treatment	净光合速率 Net photosynthetic rate $P_n/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$				蒸腾速率 Transpiration rate $T_r/(\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$				气孔导度 Stomatal conductance $G_s/(\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$				胞间 CO_2 浓度 Intercellular CO_2 concentration $C_i/(\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})$			
	拔节期 Jointing stage	吐丝期 Silking stage	灌浆期 Filling stage	成熟期 Maturity stage	拔节期 Jointing stage	吐丝期 Silking stage	灌浆期 Filling stage	成熟期 Maturity stage	拔节期 Jointing stage	吐丝期 Silking stage	灌浆期 Filling stage	成熟期 Maturity stage	拔节期 Jointing stage	吐丝期 Silking stage	灌浆期 Filling stage	成熟期 Maturity stage
	拔节期 Jointing stage	吐丝期 Silking stage	灌浆期 Filling stage	成熟期 Maturity stage	拔节期 Jointing stage	吐丝期 Silking stage	灌浆期 Filling stage	成熟期 Maturity stage	拔节期 Jointing stage	吐丝期 Silking stage	灌浆期 Filling stage	成熟期 Maturity stage	拔节期 Jointing stage	吐丝期 Silking stage	灌浆期 Filling stage	成熟期 Maturity stage
CK	32.35b	34.47b	17.75c	9.77c	4.28e	7.14c	3.17c	2.24c	0.21b	0.38b	0.20c	0.10e	162.18a	91.53a	138.26a	154.29a
PU1	38.64a	41.36a	19.66bc	11.15bc	5.64a	7.93c	3.65c	2.31c	0.25a	0.8b	0.21bc	0.12de	134.33b	80.46ab	130.04ab	146.28ab
PU2	37.51ab	41.62a	20.19bc	11.83abc	5.43ab	8.18c	3.93bc	2.46bc	0.25a	0.40b	0.22abc	0.14cde	140.62b	78.72ab	128.92ab	142.64abc
PU3	36.84ab	42.38a	23.54ab	12.54abc	5.37abc	8.33bc	4.08abc	2.52bc	0.24a	0.41b	0.22abc	0.14cd	146.52ab	76.19ab	116.65bc	140.13abc
PCU1	35.93ab	44.54a	25.27a	14.16ab	4.91bcd	9.89a	4.62ab	3.11ab	0.24a	0.44a	0.23abc	0.16bc	145.33ab	65.42b	110.64c	138.52bc
PCU2	35.18ab	44.83a	25.92a	14.92ab	4.75de	9.52ab	4.81ab	3.62a	0.244a	0.44a	0.24ab	0.19ab	146.09ab	64.19b	106.54c	133.26bc
PCU3	35.46ab	44.62a	25.54a	14.54ab	4.68de	9.61a	4.73ab	3.29a	0.24a	0.45a	0.23ab	0.18ab	150.11ab	66.84b	109.64c	136.51bc
PCU4	35.37ab	44.97a	26.81a	15.68a	4.84cde	9.76a	4.96a	3.84a	0.24a	0.45a	0.24a	0.20a	148.72ab	67.41b	104.24c	130.46c

注: 同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Different small letters in the same column showed significant difference among treatment ($P<0.05$).

成熟期 PCU1、PCU2、PCU3、PCU4 较 PU1、PU2、PU3 叶片 Tr 分别提高 13.245 ~ 35.89% 和 23.41% ~ 66.23%, PCU4 的 Tr 最高, 分别为 $4.96 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 和 $3.84 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 。

从表 2 可以看出, 施氮可以提高叶片 G_s 且随着玉米生育时期推进 G_s 先升高后降低。拔节期除 CK 外其它各处理间无显著差异, 其中 PU1 叶片气孔导度最大为 $0.25 \text{ mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$; 吐丝期 PCU1、PCU2、PCU3、PCU4 间无显著差异但较 PU1、PU2、PU3 提高 1.56% ~ 15.11%, PCU4 叶片 G_s 最大为 $0.45 \text{ mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$; 灌浆期和成熟期 PCU1、PCU2、PCU3、PCU4 较 PU1、PU2、PU3 提高 G_s 2.50% ~ 14.53% 和 16.33% ~ 56.30%, 其中 PCU4 最大为 $0.24 \text{ mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 和 $0.20 \text{ mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 。

从表 2 可以看出, 随着生育时期推进, 不同处理叶片 C_i 呈 U 型变化, 吐丝期各处理叶片 C_i 最低。除 CK 外各处理间拔节期 CO_2 浓度在拔节期无显著差异; 吐丝期、灌浆期和成熟期 PCU1、PCU2、PCU3、PCU4 比 PU1、PU2、PU3 降低 11.52% ~ 20.22%、5.15% ~ 19.84% 和 1.15% ~ 10.82%, 吐丝期 PCU2 叶片 C_i 最低为 $64.19 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 灌浆期和成熟期 PCU4 叶片 C_i 最低分别为 $104.24 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 和 $130.46 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

2.4 缓释与普通尿素分层配施对玉米产量及经济效益的影响

从图 5 可以看出, 施氮显著增加玉米产量和经济效益, 2017 年产量和经济效益均高于 2018 年。与普通尿素一次性施肥、普通尿素传统施肥相比, 分层施肥产量分别提高了 0.04% ~ 26.16% 和 2.37% ~ 22.36%; PCU1 ~ PCU4 处理产量较其它处理提高 2.32% ~ 26.16% 和 1.32% ~ 22.36%, 经济效益增加 1.67% ~ 31.84% 和 0.33% ~ 27.49%。2 a 中 PCU4 处理产量最高, 分别为 $13\,899.08 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $12\,439.35 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 经济效益分别为 $17\,022.25 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $14\,832.65 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

3 讨 论

施用氮肥可以提高农田氮素水平, 满足农作物对于养分的吸收, 适宜的氮肥运筹方式有利于玉米养分转运效率的提高^[27-29]。由于试验地区为东北半干旱区松嫩平原地带, 当地降雨主要集中于 6—8 月份, 尤其以 8 月份降雨较多, 本试验中 8 月份为玉米吐丝期, 此时过多降雨容易造成土壤中氮素的淋溶损失, 试验结果表明, 与普通尿素 1 次施肥及普通尿素传统 2 次施肥相比, 分层施肥显著增加吐丝期

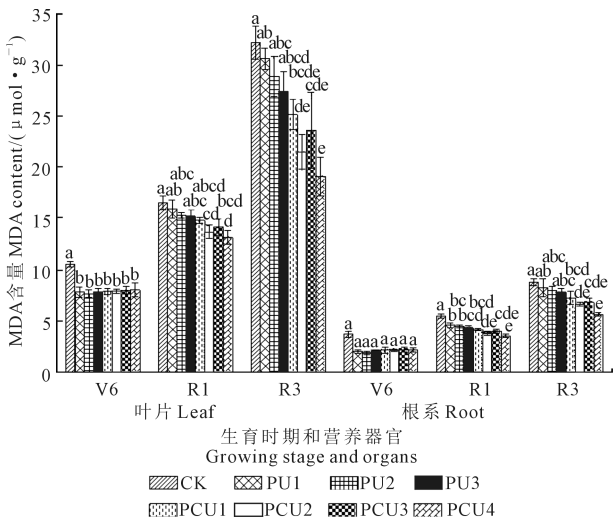
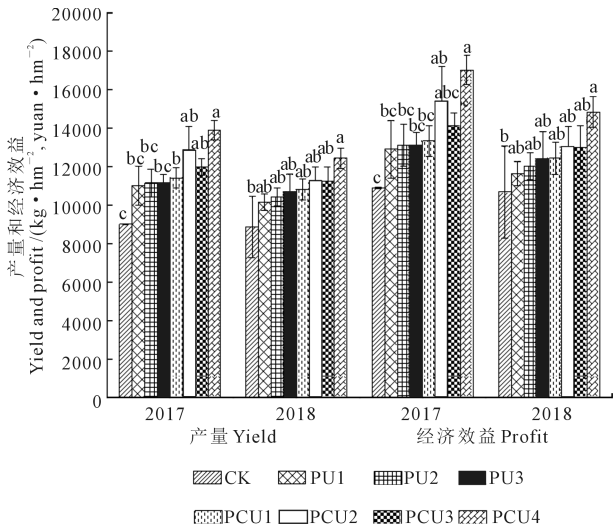


图 4 缓释与普通尿素分层配施对玉米根系及叶片 MDA 含量的影响

Fig.4 Effects of combined application of slow-release with common urea at different depths on MDA content in maize roots and leaves



注: 经济效益 = 玉米产值 - 氮肥成本 - 其它成本。玉米价格为 $1\,500 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1}$, 缓释尿素价格为 $3\,500 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1}$, 普通尿素价格为 $2\,100 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1}$, 其它成本包括磷肥 $900 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1}$, 钾肥 $3\,600 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1}$, 种子 $1\,134 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$, 共计 $2\,610 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$, 由于试验为理论探究试验, 故在核算成本时未考虑田间机械和人工成本。

Note: Economic benefits = maize output value - nitrogen fertilizer cost - other costs. The price of maize was $1\,500 \text{ yuan} \cdot \text{t}^{-1}$, the price of slow-release urea was $3\,500 \text{ yuan} \cdot \text{t}^{-1}$, and the price of common urea was $2\,100 \text{ yuan} \cdot \text{t}^{-1}$. Other costs include: $900 \text{ yuan} \cdot \text{t}^{-1}$ of phosphate fertilizer, $3\,600 \text{ yuan} \cdot \text{t}^{-1}$ of potash fertilizer, $1\,134 \text{ yuan} \cdot \text{hm}^{-2}$ of seeds, and a total of $2\,610 \text{ yuan} \cdot \text{hm}^{-2}$. As the experiment was a theoretical exploration experiment, field machinery and labor costs were not considered in the cost accounting.

图 5 缓释与普通尿素分层配施对玉米产量及经济效益的影响
Fig.5 Effects of combined application of slow-release with common urea at different depths on maize yield and economic benefit

和灌浆期土壤中 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 含量,其中缓释与普通尿素分层1次施肥氮素含量显著高于普通尿素分层1次施肥。这可能是普通尿素前期释放较快,增加了氮素淋溶,所以0~30 cm 土层氮素含量较低,PU3处理由于分层施入土壤所以氮素含量高于PU1和PU2,而缓释尿素由于物理包膜材质的原因其释放速度较慢,在一定程度上阻滞其氮素淋溶,保证了土层中的氮素含量,说明通过分层施肥方式把尿素施入不同土层有利于提高玉米生育后期土壤中的氮素含量,同时缓释尿素和普通尿素不同比例配施效果优于普通尿素,这是缓释尿素发挥了“前控后保”的作用。

玉米花后籽粒形成和根系及叶片衰老并进,延缓根系衰老吸收养分来延长绿叶持续期进而延长籽粒有效灌浆是玉米获得高产的基础^[30-31]。叶片和根系不断衰老,植株体内用来表征衰老程度的SOD、POD、CAT活性不断下降,可溶性蛋白含量降低,MDA含量增加,引起蛋白质、核酸等生物大分子降解和生物膜脂过氧化,导致叶片和根系生理功能衰退,所以延缓叶片和根系衰老是提高玉米产量的有效措施。研究表明不同的氮肥种类和用量对叶片和根系衰老影响显著^[32],SOD、POD和CAT含量与玉米产量达显著水平^[33]。本研究结果表明,施氮处理能够延缓吐丝后叶片和根系的衰老,在氮素施用量相同情况下,不同种类尿素的施用方式对叶片和根系保护酶活性影响显著,其中缓释与普通尿素分层配施基施,在吐丝期和灌浆期通过保证充足的氮素供应来为保护酶的合成提供充足的氮源,使保护酶体系维持在较为稳定的状态,显著提高根系和叶片中SOD、POD、CAT活性和可溶性蛋白含量,降低MDA含量,说明缓释尿素的施用更有利于花后叶片和根系衰老的延缓,这与邵国庆^[34]的研究结果一致。普通尿素的施用在前期氮素释放很快,到了生育后期造成氮素供应不足,而缓释尿素与普通尿素配施在前期较慢释放氮素来满足作物前期生长对氮素的需求,生育后期其不断释放来满足后期需求,进而保证整个生育时期的需求;充足的氮素供应有利于改善细胞内活性氧产生与清除之间的平衡关系,更好满足源库关系,促进根系细胞分裂素向地上运输,进而保证生育后期叶片和根系的活力较强,延缓衰老^[35-36]。

有研究表明缓释尿素能够继续维持玉米生育后期叶片光合特性^[37-39],本试验结果与其一致,缓释与普通尿素分层配施基施处理叶片在吐丝期和灌浆期净光合速率、气孔导度、蒸腾速率都保持较

高水平,胞间 CO_2 浓度显著降低,主要是由于光合速率影响植物在光合作用中吸收的 CO_2 量,从而影响单位时间、单位面积所转化的同化物质,为玉米产量增加奠定基础;同时植物进行光合作用时经由气孔吸收 CO_2 ,气孔根据环境条件的变化来调节开度而使植物在损失水分较少的条件下获取最多的 CO_2 ,光合作用时在胞内大量消耗利用 CO_2 ,需要胞间 CO_2 来补充,因此降低了其浓度,最终显著增加作物产量^[40]。

本研究结果表明,在吐丝期和灌浆期各缓释尿素施肥处理中以PCU4处理的 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 含量较高。吐丝期是玉米生长关键时期,此时对氮素需求较高,PCU4处理在种子下方15~20 cm 施入总氮的50%,缓释与普通尿素以5:5的比例配施能够满足其在吐丝期等生长关键时期对氮素的大量需求。吐丝期后虽然对氮素需求仍然较高,但是较吐丝期有所下降,因此在种子下方25~30 cm 施入总氮的30%来满足需求,缓释与普通尿素以3:7的比例配施即能满足需求。PCU4处理较高的氮素保证了玉米生育关键时期的氮素供应,增加了同时期根系和叶片中SOD、POD和CAT等保护酶活性及可溶性蛋白含量,降低了MDA含量,延缓了根系和叶片的衰老,增加了净光合速率、蒸腾速率和气孔导度,降低了胞间 CO_2 浓度,保证了穗位叶良好的光合性能,增加了干物质和籽粒的积累,最终提高产量。

玉米产量形成受到多种因素的影响,花后氮素是否供应充足是影响产量的重要因素,本研究中施用缓释尿素延缓玉米生育后期叶片和根系的衰老,保证后期光合作用的持续进行,使更多的太阳能转化成有机物质,提高玉米产量。据报道已研制出分层施肥器械^[41-42],将来应用该项技术时可一次将肥料施入土层中,省去了后期追肥的机械投入和机械进地过程,可不用机械压实土壤,达到一次施肥且减少成本的目的。因此缓释与普通尿素分层配施在生产实践中具有应用前景,本研究为其提供了部分理论参考依据。

4 结 论

普通尿素分层施肥和缓释与普通尿素分层配施能增加玉米生育后期氮素含量,延缓根叶衰老,提升叶片光合特性,增加玉米产量。各处理中以缓释与普通尿素在种子下方15~20 cm 和25~30 cm 处分别以5:5和3:7比例配施处理效果最佳,可为当地缓释尿素的推广提供理论依据。

参 考 文 献:

[1] 李合生.现代植物生理学(第2版)[M].北京:高等教育出版社,2006:76-99.

[2] 韩萍,李海燕,王丹,等.美国玉米生产概述[J].中国农学通报,2008,24(10):243-247.

[3] 李利利,张吉旺,刘伟,等.高产玉米新品种登海 661 的高产特性研究[J].玉米科学,2011,19(5):83-86.

[4] Russell W A. Genetic improvement of maize yields [J]. Advances in Agronomy, 1991, 46:245-298.

[5] Duvick D N. Genetic contributions to advances in yield of US maize [J]. Maydica, 1992, 37(1):69-79.

[6] Tollenaar M, Lee E A. Yield potential, yield stability and stress tolerance in maize [J]. Field Crops Research, 2002, 75(2-3):161-169.

[7] 朱兆良,金继运.保障我国粮食安全的肥料问题[J].植物营养与肥料学报,2013,19(2):259-273.

[8] 马兴立,谌涛,李健,等.不同植物生长调节物质对玉米叶片衰老及产量的影响[J].玉米科学,2010,18(3):105-107,112.

[9] 郭书亚,张新,张前进,等.秸秆覆盖深松对夏玉米花后穗位叶衰老和产量的影响[J].玉米科学,2012,20(1):104-107.

[10] Barja G. Free radicals and aging [J]. Trends in Neuroences, 1994, 4(4):279-288.

[11] 王宝山.生物自由基与植物膜伤害[J].植物生理学通讯,1988,(2):12-16.

[12] 刘道宏.植物叶片的衰老[J].植物生理学通讯,1983,(2):14-19.

[13] 李潮海,尹飞,王群.不同耐旱性玉米杂交种及其亲本叶片活性氧代谢对水分胁迫的响应[J].生态学报,2005,26(6):1912-1919.

[14] 任佰朝,张吉旺,李霞,等.大田淹水对夏玉米叶片衰老特性的影响[J].应用生态学报,2014,25(4):1022-1028.

[15] 郑春芳,姜东,戴廷波,等.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[J].生态学报,2010,30(5):1174-1183.

[16] 耿计彪,张民,马强,等.控释氮肥对棉花叶片生理特性和产量的影响[J].水土保持学报,2015,29(4):267-271.

[17] 李广浩,刘平平,赵斌,等.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[J].应用生态学报,2017,28(2):571-580.

[18] 李广浩,赵斌,董树亭,等.控释尿素水氮耦合对夏玉米产量和光合特性的影响[J].作物学报,2015,41(9):1406-1415.

[19] 叶喜文,马德全.测土配方施肥技术手册[M].哈尔滨:哈尔滨地图出版社,2008:133-141.

[20] 关松荫,张德生,张志明.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986:272-274.

[21] 鲍士旦.土壤化学分析(第3版)[M].北京:中国农业出版社,2005:34-35.

[22] 王爱国,罗广华,邵从本,等.大豆种子超氧化物歧化酶的研究[J].植物生理学报,1983,9(1):77-84.

[23] 陈建勋,王晓峰.植物生理学实验指导[M].广州:华南理工大学出版社,2006:72-73.

[24] Xue Y F, Liu Z P, Mehta S K, et al. Protective role of Ca against NaCl toxicity in Jerusalem artichoke by up-regulation of antioxidant enzymes[J]. Pedosphere, 2008, 18(6):766-774.

[25] 林植芳,李双顺,林桂珠,等.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[J].植物学报,1984,26(6):605-615.

[26] Ries G S K. Superoxide dismutases: I. Occurrence in higher plants [J]. Plant Physiology, 1977, 59(2):309-314.

[27] 漆栋良,胡田田.灌水施氮方式对玉米生育期土壤 NO₃⁻-N 时空分布的影响[J].农业机械学报,2017,48(2):279-287.

[28] 尹彩侠,李前,孔丽丽,等.控释氮肥减施对春玉米产量、氮素吸收及转运的影响[J].中国农业科学,2018,51(20):3941-3950.

[29] 朱启东,鲁艳红,廖育林,等.施氮量对双季稻产量及氮磷钾吸收利用的影响[J].水土保持学报,2019,33(2):183-188.

[30] 董树亭,高荣歧,胡昌浩,等.玉米花粒期群体光合性能与高产潜力研究[J].作物学报,1997,(3):318-325.

[31] 吕丽华,赵明,赵久然,等.不同施氮量下夏玉米冠层结构及光合特性的变化[J].中国农业科学,2008,41(9):2624-2632.

[32] 聂军,郑圣先,戴平安,等.控释氮肥调控水稻光合功能和叶片衰老的生理基础[J].中国水稻科学,2005,19(3):255-261.

[33] 牛巧龙,曹高燚,杜锦,等.施氮量对玉米产量及叶片部分酶活性的影响[J].华北农学报,2017,32(1):187-192.

[34] 邵国庆,李增嘉,宁堂原,等.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[J].中国农业科学,2009,42(10):3459-3466.

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

[36] 刘连涛,李存东,孙红春,等.氮素营养水平对棉花衰老的影响及其生理机制[J].中国农业科学,2009,42(5):1575-1581.

[37] Geng J B, Ma Q, Chen J Q, et al. Effects of polymer coated urea and sulfur fertilization on yield, nitrogen use efficiency and leaf senescence of cotton [J]. Field Crops Research, 2016, 187: 87-95.

[38] 卫丽,马超,黄晓书,等.控释肥对夏玉米碳、氮代谢的影响[J].植物营养与肥料学报,2010,16(3):773-776.

[39] 苏琳,董志新,邵国庆,等.控释尿素施用方式及用量对夏玉米氮肥效率和产量的影响[J].应用生态学报,2010,21(4):915-920.

[40] 叶子飘.光合作用对光和 CO₂ 响应模型的研究进展[J].植物生态学报,2010,34(6):727-740.

[41] 张俊雄,刘华猛,高金,等.玉米分层正位穴施肥精播机 SPH 仿真与试验[J].农业机械学报,2018,49(9):66-72.

[42] 王云霞,梁志杰,崔涛,等.玉米分层施肥器结构设计与试验[J].农业机械学报,2016,47(S1):163-169.