

普通尿素与控释尿素配施比例和方法对土壤氮素供应和春玉米产量的影响

冯朋博, 康建宏*, 梁熠*, 王乐, 王月宁, 马雪莹, 王浩, 坚天才

(宁夏大学农学院, 宁夏银川 750021)

摘要:【目的】宁夏南部山区玉米生产中施肥不合理, 氮素供需矛盾突出。研究普通尿素与控释尿素配施对土壤氮素、酶活性及玉米产量形成的影响, 为玉米高产高效栽培提供一定的理论依据。【方法】以先玉 698 为试材, 在施氮 225 kg/hm² 条件下, 设置控释尿素和普通尿素配施比例及施用时期处理: 不施肥 (T1); 普通尿素 2/3 基施、1/3 小喇叭口期追施 (T2); 1/3 控释尿素氮 + 1/3 普通尿素氮基施, 小喇叭口期 1/3 普通尿素氮追施 (T3); 2/3 控释尿素氮 + 1/3 普通尿素氮一次基施 (T4); 控释尿素一次基施 (T5)。探讨不同处理对土壤不同形态氮素含量、土壤酶活性、植株氮素利用效率及产量的影响, 并对相关指标进行主成分分析。【结果】在玉米灌浆期, T3、T4、T5 处理 0—20、20—40 cm 土层 NH₄⁺-N 含量均显著高于 T2 处理 ($P < 0.05$); 土壤 NO₃⁻-N 含量在 0—20 cm 土层玉米拔节期 T2 处理较 T3、T4、T5 处理高, 灌浆期 T3、T4、T5 处理较 T2 处理高, 20—40 cm 土层, 玉米大喇叭口期 T2 处理较 T3、T4、T5 处理高, 成熟期 T3、T4、T5 处理较 T2 处理高, 且处理间差异达到显著水平 ($P < 0.05$); 土壤无机氮含量, 在玉米拔节期 0—20、20—40 cm 土层 T2 处理较 T3、T4、T5 处理高, 在玉米成熟期 0—20、20—40 cm 土层 T3、T4、T5 处理较 T2 处理高, 且处理间差异达到显著水平 ($P < 0.05$)。在玉米拔节期 0—20 cm 土层 T2 处理的脲酶活性较 T4、T5 处理分别高 45.8%、54.7%, 同时期 20—40 cm 土层 T2 处理的土壤脲酶活性分别较 T4、T5 处理高出 38.2%、76.9%, 在灌浆期 20—40 cm 土层 T5 处理的脲酶活性较 T2 处理提高 15.6%; 随着控释尿素比例增加, 土壤碱性磷酸酶活性达到峰值的时间延长; 过氧化氢酶活性在施控释尿素的土壤中变化不明显。两年试验 T4 处理的平均产量较 T2 处理高出 6.89%, 相对经济效益较 T2 处理高出 6.76%。通过对所测土壤指标与产量进行主成分分析, 结果表明硝态氮、无机氮对产量的贡献率最高。【结论】普通尿素与控释尿素配施可以调节耕层土壤铵态氮、硝态氮、无机氮含量, 提高土壤脲酶、碱性磷酸酶活性, 确保土壤持续稳定地供给玉米生长发育所需的氮素。在施 N 225 kg/hm² 条件下, 普通尿素与控释尿素按 1:2 配合一次性基施, 可协调肥料氮素释放与作物养分吸收, 实现土壤供氮与作物需氮之间的平衡, 达到作物绿色高产高效栽培的目的。

关键词: 春玉米; 控释尿素; 配施比例; 施用时期; 产量

Effects of combination ratio and application method of conventional urea and controlled release urea on soil nitrogen supply and spring maize yield

FENG Peng-bo, KANG Jian-hong*, LIANG Yi*, WANG Le, WANG Yue-ning, MA Xue-ying, WANG Hao, JIAN Tian-cai
(College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: 【Objectives】Unreasonable fertilization in maize (*Zea mays* L.) production in the mountainous regions of southern Ningxia will cause imbalance between the N supply and demand. We studied the combination ratio and application method of conventional urea and controlled release urea, in order to propose an efficient and economically suitable nitrogen management strategy for maize production. 【Methods】In this research, spring

收稿日期: 2019-06-10 接受日期: 2019-10-14

基金项目: 国家科技支撑项目 (2015BAD22B01); 宁夏自然科学基金 (2018AAC03003); 宁夏重点研发计划项目 (2018BBF0218, 2019BBF2003)。

联系方式: 冯朋博 E-mail: Fengpengbo2018@163.com

* 通信作者 康建宏 E-mail: kangjianhong@163.com; 梁熠 E-mail: liangmeng0122@126.com

maize cultivar ‘Xianyu 698’ was used as the experimental materials, the controlled release urea (CRU) and conventional urea (urea) were applied in different proportions and growing stages of maize, at the total N input rate of 225 kg/hm². The five treatments were: T1, no fertilization; T2, urea, 2/3 base applied and 1/3 top-dressed; T3, 2/3 N (half CRU and half urea) basal applied, and 1/3 N in urea top-dressed; T4, total N basal applied in one time (2/3 CRU + 1/3 urea); T5, total N basal applied in one time (100% CRU). The soil N contents and some enzyme activities, and the maize plant N contents and yield were measured. **【 Results 】** In grain filling period of maize, the NH₄⁺-N contents in 0–20 and 20–40 cm soil layers of T3, T4 and T5 were all significantly higher than those of T2. In the 0–20 cm soil layer, the NO₃⁻-N content of T2 was higher than those of T3, T4 and T5, respectively. In the maize filling period, those of T3, T4 and T5 were higher than that of T2, respectively. In the 20–40 cm soil layer, the soil NO₃⁻-N content of T2 was higher than those of T3, T4 and T5, respectively. Those of T3, T4 and T5 were higher than that of T2 in maize ripening period. The difference among treatments in the same period reached a significant level ($P < 0.05$). In the jointing stage of maize, the soil inorganic nitrogen content of T2 in 0–20 and 20–40 cm soil layers was higher than those of T3, T4 and T5, respectively. In the mature stage of maize, the soil inorganic nitrogen contents of T3, T4 and T5 in 0–20 and 20–40 cm soil layers were higher than those of T2, respectively. The difference among treatments in the same period reached a significant level ($P < 0.05$). At the jointing stage of maize, the urease activity of T2 in 0–20 cm soil layer was 45.8% and 54.7% higher than those of T4 and T5. At the same time, the soil urease activity of T2 in 20–40 cm soil layer was 38.2% and 76.9% higher than those of T4 and T5. During the grain filling stage of maize, the urease activity of T5 in the 20–40 cm soil layer was increased by 15.6% compared with T2. With the increase of the proportion of controlled release urea, the later the activity of soil alkaline phosphatase reached peak. Catalase activity did not change significantly in controlled release urea treatment. The average yield of T4 in the two-year experiment was 6.89% higher than that of T2, and the relative economic benefit was 6.67% higher than that of T2. Principal component analysis of soil related indicators and yields showed that nitrate nitrogen, inorganic nitrogen contributed to the yield most.

【 Conclusion 】 Comprehensively, compared with conventional urea, conventional urea combined with controlled release urea has more positive effects on the content of ammonium nitrogen, nitrate nitrogen and inorganic nitrogen in the plough layer soil, coordinates the activities of soil urease and alkaline phosphatase, and improves the nitrogen needed for the soil to sustain and stably supply the growth and development of maize. Conventional urea/controlled release urea is applied in the ratio of 1 : 2 in the circumstances of equal nitrogen fertilization, which can fully exert the advantages of the nutrient release characteristics and the crop nutrient absorption, achieve the balance between the level of nitrogen supply in the soil and the nitrogen requirement of crops. At the same time, this pattern could achieve the goal of high yield and high efficiency cultivation of spring maize.

Key words: spring maize; controlled release urea; combination ratio; application time; yield

在玉米生长发育和产量形成过程中, 氮扮演着重要角色^[1-4]。近年来在农业生产中对氮肥施用不合理, 导致氮肥利用率低, 效益下降, 同时造成水体污染, 对生态环境构成潜在威胁^[5-8]。为了减少氮素的损失, 提高肥料利用率, 世界各国开展了广泛的研究, 如平衡施肥、肥料深施、多次施肥技术、新型肥料的研发等。随着农村劳动力的逐渐减少, 农村施肥逐渐向便捷化发展, 缓/控释尿素因其简便高效的特点在农业生产中已成为研究热点^[9]。

玉米是宁夏南部山区主栽作物, 近年来, 由于农村青壮年多外出务工、农村劳力减少, 且在玉米拔节期追肥困难, 田间施肥常出现底肥、追肥“一炮轰”的现象, 导致氮素养分释放过快, 难以实现玉米高产高效栽培。王寅等^[10]提出控释尿素与尿素按适宜比例掺混施用作为当前普通肥料一次性施用的替代技术, 可达到节本增效的目的。有学者用盆栽试验研究控释尿素与普通尿素配施对夏玉米生育期土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 的影响表明, 土壤中 NH₄⁺-

N 含量保持在较稳定水平,可有效降低 NO_3^- -N 的淋失,防止对环境的污染^[11]。李玉浩等^[12]通过研究盆栽水稻表明,控释氮肥与普通尿素配施增加了土壤中无机氮含量,促进了土壤微生物繁殖,达到了水稻增产目标。王素萍等^[13]研究控释尿素和普通尿素配施对田间土壤无机氮的影响表明,两者配施的土壤无机氮含量明显高于单施普通尿素。王晓琪等^[14]以普通尿素为对照,通过水稻试验表明,在相同施氮量条件下控释尿素能够为水稻提供较为稳定的氮素来源,更有利于水稻中后期氮素供应。郭新送等^[15]通过研究控释尿素配施微生物菌剂对小麦氮肥利用率及土壤酶活性的影响表明,控释尿素配施微生物菌剂能够提高土壤硝态氮、铵态氮含量,提高土壤脲酶、过氧化氢酶和蔗糖酶活性。尿素与控释氮肥配施土壤中 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 浓度增加,特别是在作物生育后期,土壤氮素的淋溶降低,最终可提高作物产量和氮素利用效率,同时降低肥料成本和施肥所需的劳动力^[16]。但是,有关普通尿素与控释尿素配施对宁夏南部山区玉米种植带土壤的氮素供应、酶活性及玉米产量的影响研究相对较少。因此,通过开展普通/控释尿素对土壤不同形态氮、土壤酶活性及玉米产量的影响研究,找出更有利于玉米绿色高效生产的施肥方式,为宁夏南部山区玉米高产高效栽培提供科学依据与理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验点位于宁夏固原市彭阳县城阳乡长城村。地处宁夏南部边缘,六盘山东麓,北纬 $35^\circ 51' 42''$,东经 $106^\circ 40' 27''$,海拔高度为 1660 m,属黄土高原半干旱雨养农业区,年降水量 350~500 mm,7—9 月降水占全年 60% 以上,2017、2018 年玉米生育期(4—9 月)降雨量分别为 337、578 mm,无霜期 140~170 天,年平均气温 8.0°C , $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温约 2700°C 。土壤类型为黄绵土,两年试验在同一区域的不同地块进行种植,处理相同。土壤的基础理化

性质如表 1。

1.2 试验设计

1.2.1 供试材料 供试玉米品种为先玉 698。供试尿素($\text{N} \geq 46.4\%$)由中国石化宁夏分公司生产,聚氨酯包膜控释尿素(纯 $\text{N} \geq 43.2\%$)生产商为宁夏荣和绿色科技有限公司,释放期为 70 天。

1.2.2 试验设计 设 5 个处理,具体为:不施肥(T1);普通尿素 2/3 基施,1/3 在小喇叭口期追施(T2);1/3 控释尿素氮 + 1/3 普通尿素氮基施,1/3 普通尿素氮在小喇叭口期追施(T3);2/3 控释尿素氮 + 1/3 普通尿素氮一次基施(T4);控释尿素一次基施(T5)。小区面积为 33.4 m^2 ,每个处理 4 次重复。除 T1 外,所有处理施化肥量均为 $\text{N } 225\text{ kg/hm}^2$ 、 P_2O_5 120 kg/hm^2 (过磷酸钙)和 $\text{K}_2\text{O } 60\text{ kg/hm}^2$ (硫酸钾),基施氮肥和磷钾肥在玉米播种前分小区均匀撒施后进行旋耕,整地,起垄覆膜。追施氮肥于小喇叭口期进行。

1.2.3 种植方式及田间管理 玉米采用全覆膜双垄沟播技术种植,播深 3~4 cm,种植行距为宽窄行起垄种植,宽行 60 cm、窄行 50 cm,株距为 30.3 cm,垄高 6 cm,垄沟深 3 cm,种植密度为 60000 株/hm^2 ,播种方式为人工精量点播,其他管理与大田管理一致。2017 年 4 月 20 日播种,10 月 3 日收获;2018 年 4 月 17 日播种,9 月 25 日成熟,10 月 5 日收获。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 土样采集 2018 年在玉米拔节期、大喇叭口期、花期、灌浆期、成熟期取样,共取 5 次。用土钻分 2 层(0—20、20—40 cm)取土样,将所取鲜土进行分装,带回实验室进行风干过筛,测定不同形态氮素及土壤酶活性。

1.3.2 氮素测定 称取过 1 mm 筛风干土样 5 g 于塑料瓶中,加入 0.5 mol/L 硫酸钾 30 mL,振荡 1 h,过滤到干燥三角瓶中。硝态氮含量采用紫外分光光度计法^[17]测定,铵态氮含量采用靛酚蓝比色法^[16]测定。土壤无机氮含量为铵态氮与硝态氮含量之和^[17-18]。

1.3.3 土壤酶活性测定 土壤脲酶活性采用比色法

表 1 试验地 0—40 cm 土层理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of 0—40 cm layer of the experimental soil

年份 Year	土壤容重 (g/cm^3) Bulk density	有机质 (g/kg) Organic matter	全氮 (g/kg) Total N	碱解氮 (mg/kg) Available N	有效磷 (mg/kg) Available P	速效钾 (mg/kg) Available K	全盐 (g/kg) Total salt	pH
2017	1.51	16.46	0.62	88.25	29.23	126.24	1.95	7.44
2018	1.49	14.59	0.69	88.25	35.23	142.24	1.95	8.74

测定, 碱性磷酸酶活性采用比色法测定, 过氧化氢酶活性采用滴定法测定^[19-20]。

1.3.4 植株氮素测定 2017、2018 年在玉米收获期, 每小区选取代表性植株 5 株, 分成茎鞘、叶、籽粒和苞叶, 105℃ 下杀青 30 min, 80℃ 下烘干至恒重, 测定干物重后进行粉碎, 采用半微量凯氏定氮法测定氮含量。氮素利用率计算方法参照 Moll 等^[21]:

氮肥农学利用率 (kg/kg) = (施氮区玉米产量 - 对照区玉米产量)/施氮量;

氮素表观利用率 = (施氮区玉米地上部吸氮量 - 对照区玉米地上部吸氮量)/施氮量 × 100%;

肥料氮贡献率 (fertilizer contribution ratio, FCR, %) = (施氮区产量 - 对照区产量)/施氮区产量 × 100

1.3.5 产量构成因素 玉米收获时, 收获试验小区中间 4 行, 在大田直接测定其果穗总鲜重, 将穗脱粒, 并用美国帝强 Mini GAC 水分仪对籽粒进行水分测定, 并计算其出籽率。折算成 14% 含水率的产量。从所收获的玉米穗中取 20 穗进行考种。相对增产率 (%) = (施肥区产量 - 不施肥区产量)/不施肥区产量 × 100; 总收益 (× 10⁴ 元/hm²) = 各处理产量 × 单价

1.4 数据处理

数据采用 Excel 2003、SPSS17.0、R3.5.1、Duncan 新复极差法进行统计分析, Origin 2018 绘图。

2 结果与分析

2.1 普通尿素与控释尿素配施对土壤氮含量的影响

2.1.1 NH₄⁺-N 含量 由表 2 可见, 0—20 cm 土层 NH₄⁺-N 含量拔节期各施肥处理间没有显著差异, 大喇叭口期 T2、T4、T5 处理显著低于 T3 处理; 花期 T3、T4 处理显著高于 T2 处理, 与 T5 处理差异不显著, 灌浆期 T5 处理显著高于 T4 处理, T4 处理显著高于 T3 和 T2 处理, 成熟期各施肥处理间差异均不显著; 20—40 cm 土层, T2 和 T3 处理在拔节期、大喇叭口期均显著高于 T4 和 T5 处理, 花期以 T3 处理最高, 其显著高于 T2 和 T5 处理; 灌浆期 T5 处理显著高于其他处理, T3 处理又显著高于 T2 和 T4 处理。综合两层土壤 NH₄⁺-N 含量的变化规律可得出: 在玉米拔节期和花期, T3 处理两层土壤 NH₄⁺-N 均较高, 在花期之后 T4 和 T5 较高, 主要是由于控释尿素的释放及玉米对 NH₄⁺-N 吸收的结果, 而 T2 处理的土壤 NH₄⁺-N 含量与玉米需求的吻合度不如 T3、T4 处理。

2.1.2 土壤 NO₃⁻-N 含量 表 3 显示, 各处理间土壤硝态氮含量差异显著 (*P* < 0.05)。在 0—20 cm 土层, 玉米拔节期、大喇叭口期 T2 处理显著高于 T3、T4、T5 处理, 在玉米花期、灌浆期、成熟期

表 2 普通尿素与控释尿素配施对不同土层 NH₄⁺-N 含量的影响 (mg/kg)
Table 2 Effects of conventional urea combined with controlled release urea on NH₄⁺-N content in different soil layers

土层 (cm) Soil layer	处理 Treatment	拔节期 Jointing stage	大喇叭口期 Big bell stage	花期 Flowering stage	灌浆期 Filling stage	成熟期 Mature stage
0—20	T1	6.28 ± 0.83 b	9.64 ± 1.25 b	5.42 ± 0.63 c	8.28 ± 0.10 b	6.21 ± 0.28 b
	T2	8.87 ± 0.27 a	7.17 ± 0.63 c	6.81 ± 0.42 b	5.27 ± 0.39 c	7.15 ± 0.27 a
	T3	8.85 ± 0.31 a	10.90 ± 0.13 a	9.13 ± 0.87 a	6.07 ± 0.61 c	7.82 ± 0.36 a
	T4	8.72 ± 0.41 a	8.93 ± 0.38 c	8.18 ± 0.35 a	8.67 ± 0.45 b	7.69 ± 0.36 a
	T5	8.46 ± 0.49 a	7.52 ± 0.35 c	7.65 ± 0.15 ab	11.99 ± 0.69 a	7.71 ± 0.87 a
20—40	T1	4.64 ± 0.31 c	6.40 ± 0.31 a	3.51 ± 0.51 c	4.95 ± 0.31 c	5.05 ± 0.16 bc
	T2	8.46 ± 0.29 a	6.93 ± 0.66 a	3.93 ± 0.32 bc	4.93 ± 0.18 c	4.92 ± 0.28 bc
	T3	8.04 ± 0.28 a	7.05 ± 0.33 a	5.59 ± 0.49 a	7.87 ± 0.83 b	4.48 ± 0.21 c
	T4	6.96 ± 0.45 b	5.42 ± 0.11 b	4.60 ± 0.92 ab	5.76 ± 0.91 c	5.39 ± 0.53 ab
	T5	6.90 ± 0.27 b	4.61 ± 0.59 c	4.10 ± 0.26 bc	11.01 ± 0.69 a	5.79 ± 0.13 a

注 (Note): T1—不施肥 No fertilization; T2—普通尿素 2/3 基施、1/3 追施 Urea, 2/3N was applied as basal and 1/3N as topdressing; T3—1/3 控释尿素 + 1/3 普通尿素基施, 1/3 普通尿素氮追施 2/3 N (half CRU and half urea) basal applied, and 1/3 N in urea top-dressed; T4—2/3 控释尿素 + 1/3 普通尿素一次基施 Total N basal applied in one time (2/3 CRU + 1/3 urea); T5—控释尿素一次基施 Total N basal applied in one time (100% CRU). 表中数值为平均值 ± 标准差 Data in the table are mean value ± standard deviation; 同列数值后不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著 (*P* < 0.05) Values followed by different lowercase letters in column are significantly different among treatments in the same soil layer (*P* < 0.05).

表 3 普通尿素与控释尿素配施对不同土层 NO_3^- -N 含量的影响 (mg/kg)Table 3 Effects of conventional urea combined with controlled release urea on NO_3^- -N content in different soil layers

土层 (cm) Soil layer	处理 Treatment	拔节期 Jointing stage	大喇叭口期 Big bell stage	花期 Flowering stage	灌浆期 Filling stage	成熟期 Mature stage
0—20	T1	22.09 ± 1.00 d	20.78 ± 1.73 b	8.52 ± 0.73 d	19.20 ± 1.18 e	36.46 ± 0.51 d
	T2	70.78 ± 2.12 a	24.92 ± 3.13 a	11.64 ± 0.89 c	43.18 ± 0.84 d	35.87 ± 0.28 e
	T3	23.94 ± 0.65 d	16.68 ± 0.75 c	15.24 ± 1.03 b	69.03 ± 0.41 b	76.87 ± 1.19 c
	T4	50.15 ± 0.99 b	12.00 ± 0.07 d	15.41 ± 0.96 b	66.14 ± 0.42 c	85.19 ± 0.88 b
	T5	33.17 ± 1.39 c	21.81 ± 0.74 b	20.58 ± 1.32 a	92.75 ± 0.16 a	97.73 ± 2.59 a
20—40	T1	27.79 ± 0.93 e	19.17 ± 1.10 e	13.64 ± 0.93 e	13.80 ± 0.78 e	20.90 ± 0.58 d
	T2	86.68 ± 2.56 a	83.51 ± 0.42 a	37.37 ± 0.59 a	32.72 ± 0.57 c	18.17 ± 0.54 e
	T3	61.25 ± 0.82 c	52.84 ± 2.34 b	21.34 ± 1.39 c	23.19 ± 0.13 d	22.20 ± 0.27 c
	T4	66.65 ± 1.71 b	35.36 ± 0.63 c	31.15 ± 0.94 b	59.33 ± 0.48 a	24.73 ± 0.26 b
	T5	55.17 ± 1.44 d	21.79 ± 0.73 d	17.36 ± 0.43 d	36.42 ± 1.03 b	80.08 ± 0.98 a

注 (Note): T1—不施肥 No fertilization; T2—普通尿素 2/3 基施、1/3 追施 Urea, 2/3N was applied as basal and 1/3N as topdressing; T3—1/3 控释尿素 + 1/3 普通尿素基施, 1/3 普通尿素氮追施 2/3 N (half CRU and half urea) basal applied, and 1/3 N in urea top-dressed; T4—2/3 控释尿素 + 1/3 普通尿素一次基施 Total N basal applied in one time (2/3 CRU + 1/3 urea); T5—控释尿素一次基施 Total N basal applied in one time (100% CRU). 表中数值为平均值 ± 标准差 Data in the table are mean value ± standard deviation; 同列数值后不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different lowercase letters in column are significantly different among treatments in the same soil layer ($P < 0.05$).

T3、T4、T5 处理显著高于 T2 处理; 在 20—40 cm 土层, 玉米拔节期、大喇叭口期、花期 T2 处理显著高于 T3、T4、T5 处理, 在灌浆期、成熟期

T4、T5 处理分别显著高于 T2 处理。综合来看, 在玉米大喇叭口期之前 T2 处理在各土层的 NO_3^- -N 含量明显高于同时期的其它处理, 在玉米花期之后

表 4 普通尿素与控释尿素配施对不同土层无机氮含量的影响 (mg/kg)

Table 4 Effects of conventional urea combined with controlled release urea on inorganic nitrogen content in different soil layers

土层 (cm) Soil layer	处理 Treatment	拔节期 Jointing stage	大喇叭口期 Big bell stage	花期 Flowering stage	灌浆期 Filling stage	成熟期 Mature stage
0—20	T1	28.37 ± 2.27 e	30.43 ± 3.03 b	13.94 ± 1.14 d	27.48 ± 0.85 d	42.67 ± 0.28 e
	T2	79.65 ± 0.67 a	33.86 ± 1.15 a	18.45 ± 1.15 c	48.45 ± 0.43 c	44.03 ± 0.88 d
	T3	32.79 ± 1.45 d	27.59 ± 1.86 bc	23.37 ± 0.96 b	74.10 ± 0.33 b	84.69 ± 11.50 c
	T4	58.87 ± 0.22 b	20.93 ± 0.80 c	23.59 ± 1.75 b	74.82 ± 0.51 b	92.89 ± 0.97 b
	T5	41.63 ± 1.08 c	29.34 ± 0.33 b	28.23 ± 0.30 a	104.75 ± 0.65 a	105.45 ± 12.79 a
20—40	T1	32.43 ± 2.30 e	25.57 ± 0.49 d	17.15 ± 0.28 e	18.76 ± 1.17 e	25.96 ± 0.54 c
	T2	95.14 ± 1.55 a	90.45 ± 2.77 a	41.30 ± 1.81 a	37.65 ± 1.36 c	23.09 ± 1.07 d
	T3	69.29 ± 1.04 c	59.89 ± 0.56 b	26.93 ± 0.88 c	31.07 ± 0.88 d	26.69 ± 0.93 c
	T4	73.61 ± 1.06 b	40.78 ± 0.97 c	35.75 ± 0.70 b	65.10 ± 0.27 a	30.13 ± 0.03 b
	T5	62.07 ± 0.48 d	26.40 ± 1.68 d	21.47 ± 1.33 d	47.43 ± 0.74 b	85.88 ± 1.09 a

注 (Note): T1—不施肥 No fertilization; T2—普通尿素 2/3 基施、1/3 追施 Urea, 2/3N was applied as basal and 1/3N as topdressing; T3—1/3 控释尿素 + 1/3 普通尿素基施, 1/3 普通尿素氮追施 2/3 N (half CRU and half urea) basal applied, and 1/3 N in urea top-dressed; T4—2/3 控释尿素 + 1/3 普通尿素一次基施 Total N basal applied in one time (2/3 CRU + 1/3 urea); T5—控释尿素一次基施 Total N basal applied in one time (100% CRU). 表中数值为平均值 ± 标准差 Data in the table are the mean value ± standard deviation; 同列数值后不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different lowercase letters in column are significantly different among treatments in the same soil layer ($P < 0.05$).

T5 处理在各土层的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量明显高于同时期的其它处理, T2 处理与 T5 处理的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量在玉米生育期的两端呈现较高分布, T3、T4 处理在玉米拔节期、花期及灌浆期保持相对平稳, 更有利于玉米根系对土壤中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 进行有效的吸收。

2.1.3 土壤无机氮含量 由表 4 可见, 相同土层同一时期各处理土壤无机氮含量差异显著 ($P < 0.05$)。且普通尿素与控释尿素配施下 0—20、20—40 cm 土层的无机氮含量在玉米生育中、后期有明显的提升。T3、T4 处理在玉米生育期对土壤无机氮释放速度控制较好, 能够持续供应玉米生长发育所需的氮素养分。0—20 cm 土层, 在玉米大喇叭口期之前 T2 处理的无机氮含量处于较高水平, 花期之后各生育期 T3、T4、T5 处理的无机氮含量逐渐增大, 玉米拔节期、大喇叭口期 T2 处理高于 T3、T4、T5 处理; 灌浆期、成熟期 T3、T4、T5 处理高于 T2 处理。在 20—40 cm 土层, 玉米拔节期、大喇叭口期、花期 T2 处理高于 T3、T4、T5 处理; 灌浆期 T4 处理较 T2 处理高 72.91%, 成熟期 T3、T4、T5 处理分别较 T2 处理高出 15.6%、30.5%、271.9%。这进一步说明普通尿素与控释尿素配施更有利于土壤中无机氮的持续供给, 防止玉米根系早衰。

2.2 普通尿素与控释尿素配施对土壤酶活性的影响

2.2.1 土壤脲酶活性 由图 1 可知, 在玉米生育期

内 0—20 cm 土层, T2、T3 处理玉米拔节期的土壤脲酶活性达到最大值, T2 处理较同时期的 T4、T5 处理分别提高 45.8%、54.7%。T5 处理的土壤脲酶活性在玉米生育前期相对较低, 灌浆期达到最大值, T4 处理在该时期同样达到最大值, 且不同处理间在同一生育期的差异达到显著水平 ($P < 0.05$)。20—40 cm 土层, T2、T3 处理玉米拔节期的脲酶活性同样达到最高值, T2 处理分别较同时期的 T4、T5 处理高出 35.3%、76.9%, 在灌浆期 T5 处理的脲酶活性较 T2 处理提高 15.6%。

2.2.2 土壤碱性磷酸酶活性 图 2 表明, 各土层的碱性磷酸酶活性变化趋势一致。土壤碱性磷酸酶活性在整个生育期差异较小, 随控释尿素的施入量不同达到峰值时间不同, 随着控释尿素比例的增加, 碱性磷酸酶活性达到峰值的时间推迟。0—20 cm 土层, T2 处理在玉米生育前期较高, 拔节期 T2 处理分别较 T3、T4、T5 处理高 6.5%、27.8%、185.5%, 大喇叭口期 T3 处理较 T2 处理高 17.9%, 而 T4、T5 处理在生育后期持续升高, 在成熟期 T4、T5 处理分别较 T2 处理高出 17.1%、17.0%。20—40 cm 土层, 在大喇叭口期, T2 处理分别较 T3、T4、T5 处理高 11.8%、42.1%、39.5%, 成熟期 T3、T4、T5 处理分别较 T2 处理高出 20.3%、51.4%、73.3%, 说明控释尿素可以调节土壤碱性磷酸酶活性, 在一定程度上提高耕层土壤肥力。

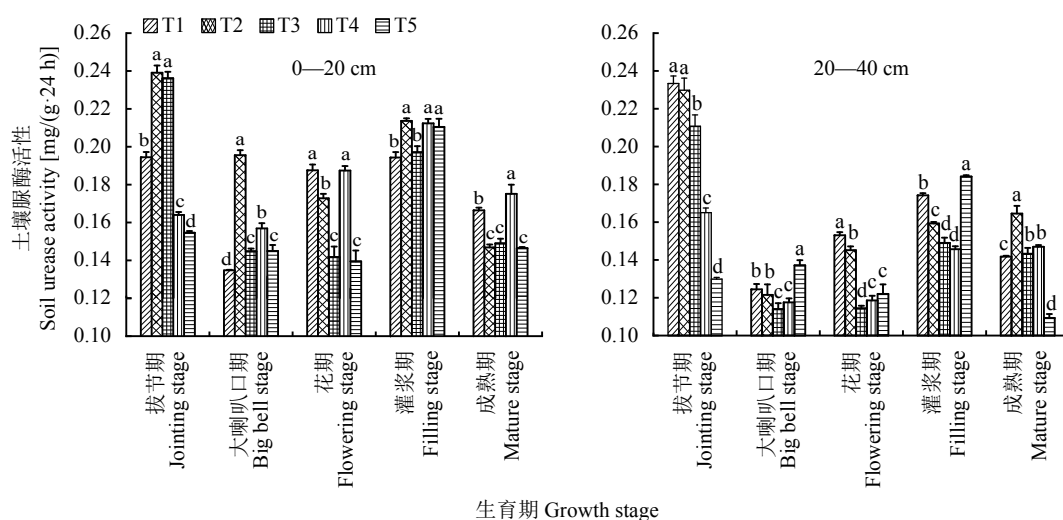


图 1 普通尿素与控释尿素配施对不同土层脲酶活性的影响

Fig. 1 Effects of conventional urea combined with controlled release urea on urease activity in different soil layers

[注 (Note): T1—不施肥 No fertilization; T2—普通尿素 2/3 基施、1/3 追施 Urea, 2/3N was applied as basal and 1/3N as topdressing; T3—1/3 控释尿素 + 1/3 普通尿素基施, 1/3 普通尿素氮追施 2/3 N (half CRU and half urea) basal applied, and 1/3 N in urea top-dressed; T4—2/3 控释尿素 + 1/3 普通尿素一次基施 Total N basal applied in one time (2/3 CRU + 1/3 urea); T5—控释尿素一次基施 Total N basal applied in one time (100% CRU). 柱上不同字母表示相同生育期不同处理间差异达 5% 显著水平 Different letters above the bars indicate significance among treatments at the same stage at the 5% level.]

2.2.3 土壤过氧化氢酶活性 图3表明,各处理过氧化氢酶活性在不同土层的变化趋势基本一致皆表现为先增后降,最终趋于平稳。在0—20 cm 土层,玉米大喇叭口期 T3、T4、T5 处理分别较 T2 处理高 3.2%、7.6%、1.8%,且在此时期不同处理间差异达

显著水平 ($P < 0.05$); 在 20—40 cm 土层,花期 T3、T4、T5 处理分别较 T2 处理高 3.0%、3.0%、6.5%。

2.3 普通尿素与控释尿素配施对玉米产量构成因素、氮肥利用效率及经济效益的影响

2.3.1 玉米产量及其构成因素 由表5可见,两年

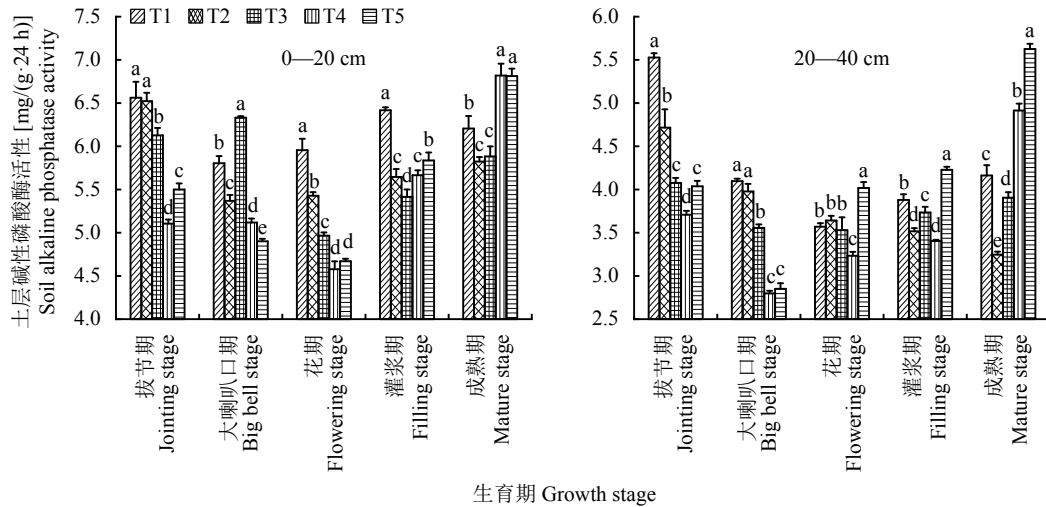


图2 普通尿素与控释尿素配施对不同土层碱性磷酸酶活性的影响

Fig. 2 Effects of conventional urea combined with controlled release urea on alkaline phosphatase activity in different soil layers

[注 (Note): T1—不施肥 No fertilization; T2—普通尿素 2/3 基施、1/3 追施 Urea, 2/3N was applied as basal and 1/3N as topdressing; T3—1/3 控释尿素 + 1/3 普通尿素基施, 1/3 普通尿素氮追施 2/3 N (half CRU and half urea) basal applied, and 1/3 N in urea top-dressed; T4—2/3 控释尿素 + 1/3 普通尿素一次基施 Total N basal applied in one time (2/3 CRU + 1/3 urea); T5—控释尿素一次基施 Total N basal applied in one time (100% CRU). 柱上不同字母表示相同生育期处理间差异达 5% 显著水平 Different letters above the bars indicate significance among treatments at the same stage at the 5% level.]

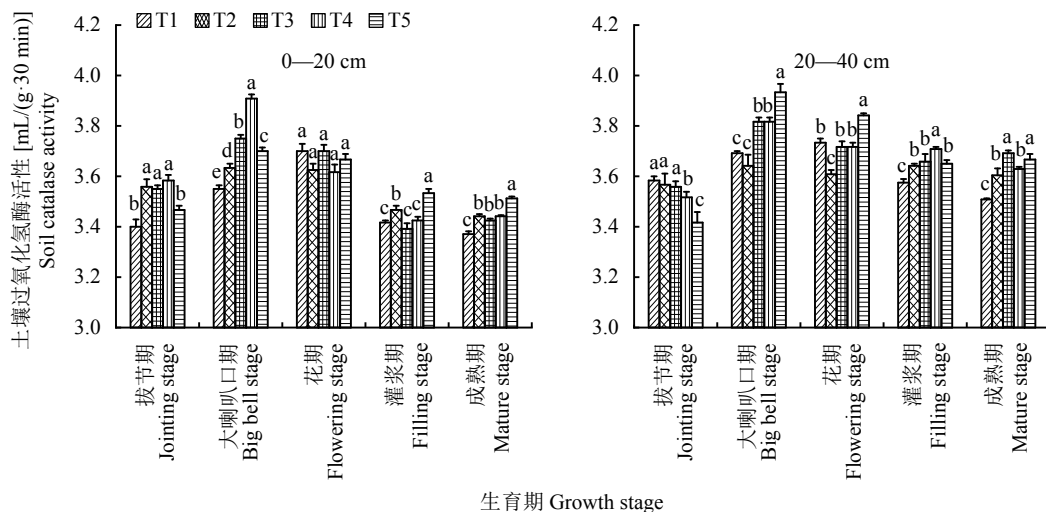


图3 普通尿素与控释尿素配施对不同土层过氧化氢酶活性的影响

Fig. 3 Effects of conventional urea combined with controlled release urea on catalase activity in different soil layers

[注 (Note): T1—不施肥 No fertilization; T2—普通尿素 2/3 基施、1/3 追施 Urea, 2/3N was applied as basal and 1/3N as topdressing; T3—1/3 控释尿素 + 1/3 普通尿素基施, 1/3 普通尿素氮追施 2/3 N (half CRU and half urea) basal applied, and 1/3 N in urea top-dressed; T4—2/3 控释尿素 + 1/3 普通尿素一次基施 Total N basal applied in one time (2/3 CRU + 1/3 urea); T5—控释尿素一次基施 Total N basal applied in one time (100% CRU). 柱上不同字母表示相同生育期不同处理间差异达 5% 显著水平 Different letters above the bars indicate significance among treatments at the same stage at the 5% level.]

表 5 普通尿素与控释尿素配施对玉米产量及产量构成因素的影响

Table 5 Effects of conventional urea combined with controlled release urea on maize yield and yield components

年份 Year	处理 Treatment	产量 (t/hm ²) Yield	相对增收率 (%) Relative yield increase	收获穗数 (× 10 ⁴ ears/hm ²) Harvest ears	穗粒数 kernel number per ear	千粒重 (g) 1000-grain weight
2017	T1	8.83 d		5.97 a	537 c	279.54 c
	T2	11.11 c	25.8	5.94 a	641 b	289.98 c
	T3	12.09 a	36.9	5.94 a	653 a	309.90 a
	T4	12.06 a	36.6	5.95 a	652 a	306.01 a
	T5	11.72 b	32.7	5.93 a	643 b	301.71 b
2018	T1	13.25 b		5.97 a	627 b	370.25 c
	T2	13.85 b	4.5	6.04 a	642 a	382.68 b
	T3	14.53 a	9.7	6.02 a	638 b	394.03 a
	T4	14.62 a	10.3	6.08 a	641 a	385.61 b
	T5	13.93 b	5.1	6.07 a	634 b	369.12 c
均值 Mean	T1	11.04 c		5.95 a	582 d	324.90 d
	T2	12.48 b	13.0	5.99 a	641.5 b	336.33 c
	T3	13.31 a	20.6	5.98 a	645.5 a	351.97 a
	T4	13.34 a	20.8	6.02 a	646.5 a	345.81 b
	T5	12.83 b	16.2	6.00 a	638.5 c	335.42 c
变异来源 Source of varieties						
处理 Treatment (T)		*	*	NS	*	*
年份 Year (Y)		*	*	NS	*	*
T × Y		*	*	NS	*	*

注 (Note): T1—不施肥 No fertilization; T2—普通尿素 2/3 基施、1/3 追施 Urea, 2/3N was applied as basal and 1/3N as topdressing; T3—1/3 控释尿素 + 1/3 普通尿素基施, 1/3 普通尿素氮追施 2/3 N (half CRU and half urea) basal applied, and 1/3 N in urea top-dressed; T4—2/3 控释尿素 + 1/3 普通尿素一次基施 Total N basal applied in one time (2/3 CRU + 1/3 urea); T5—控释尿素一次基施 Total N basal applied in one time (100% CRU). 同列数值后不同小写字母表示处理间差异达显著水平 ($P<0.05$) Values followed by different lowercase letters in a column are significantly different among treatments ($P<0.05$); NS—不显著 No significance; *— $P<0.05$.

试验中 T3、T4 处理的千粒重、穗粒数在 5 个处理中处于较高水平, 两年的平均千粒重 T3 处理分别较 T2、T5 处理两年均值高出 4.7%、4.9%, 且处理间差异达到显著水平 ($P<0.05$), 表明普通尿素与控释尿素配施的玉米果穗生长发育状况良好。两年试验产量 T3、T4 处理显著高于其他处理, 2017 年 T3、T4 处理较 T2 处理分别增产 8.8%、8.6%, 2018 年 T3、T4 处理较 T2 处理分别增产 4.9%、5.6%, 说明普通尿素与控释尿素配施能够增加籽粒重量和数量, 达到增产目的。且年份间的差异达到显著水平 ($P<0.05$)。

2.3.2 氮素利用率 T3、T4 处理的氮肥农学利用率、氮素表观利用率和氮肥贡献率均高于 T2 和 T5 处理 (表 6)。不同氮肥处理的氮素农学利用率

(AEN) 差异达到显著水平 ($P<0.05$)。两年 AEN 的平均值, T3、T4、T5 处理分别较当地传统模式 T2 处理提高 74.9%、84.9%、20.2%; 不同的氮肥处理对氮素表观利用率 (ANUE) 的影响同样达到显著水平, T3、T4、T5 处理分别较当地传统模式 T2 处理提高 49.3%、59.1%、21.9%; 两年的氮肥贡献率 (FCR) 的平均水平亦呈现相同规律, T3、T4、T5 处理分别较当地传统模式 T2 处理提高 38.5%、65.6%、12.4%。可见, 控释尿素与普通尿素的不同比例配施下氮素利用相关指标均高于尿素单施, 控释尿素与普通尿素配施可有效地促进植株氮素吸收, 实现氮素的高效利用。

2.3.3 玉米经济效益 表 7 显示, 综合两年玉米种植的经济效益, 总收益在两年间的差异明显。2017 年 T2、T3、T4、T5 处理的相对增收率分别为

表 6 普通尿素与控释尿素配施对氮素利用效率的影响

Table 6 Effects of conventional urea combined with controlled release urea on nitrogen use efficiency

年份 Year	处理 Treatment	AEN (kg/kg)	ANUE (%)	FCR (%)
2017	T2	8.96 c	15.37 d	17.76 d
	T3	14.31 a	36.84 b	22.41 b
	T4	15.32 a	42.24 a	27.01 a
	T5	10.96 b	29.20 c	19.95 c
	T2	2.67 b	35.36 b	4.33 c
2018	T3	6.03 a	38.91 a	8.18 b
	T4	6.18 a	38.48 a	9.56 a
	T5	3.02 b	32.64 c	4.88 c

注 (Note): T1—不施肥 No fertilization; T2—普通尿素 2/3 基施、1/3 追施 Urea, 2/3N was applied as basal and 1/3N as topdressing; T3—1/3 控释尿素 + 1/3 普通尿素基施, 1/3 普通尿素氮追施 2/3 N (half CRU and half urea) basal applied, and 1/3 N in urea top-dressed; T4—2/3 控释尿素 + 1/3 普通尿素一次基施 Total N basal applied in one time (2/3 CRU + 1/3 urea); T5—控释尿素一次基施 Total N basal applied in one time (100% CRU). AEN—氮肥农学利用率 Nitrogen agronomy efficiency; ANUE—氮素表观利用率 Nitrogen apparent use efficiency; FCR—氮肥贡献率 Nitrogen fertilizer contribution rate. 同列数值后不同小写字母表示同一年份不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different lowercase letters in a column are significantly different among treatments in the same year ($P < 0.05$).

表 7 普通尿素与控释尿素配施对玉米相对经济效益的影响

Table 7 Effects of conventional urea combined with controlled release urea on the relative economic benefits of maize

年份 Year	处理 Treatment	总收益 Total income ($\times 10^4$ yuan/hm ²)	氮肥投入 N fertilizer cost (yuan/hm ²)	追肥劳力投入 Fertilization labor input (yuan/hm ²)	相对经济效益 Relative economic benefit ($\times 10^4$ yuan/hm ²)
2017	T1	1.41 d			1.41
	T2	1.78 c	1027.2	450	1.63
	T3	1.93 a	1292.4	450	1.76
	T4	1.93 a	1557.7	0	1.77
	T5	1.88 b	1822.9	0	1.69
2018	T1	2.12 c			2.12
	T2	2.22 b	1027.2	450	2.07
	T3	2.32 a	1292.4	450	2.15
	T4	2.34 a	1557.7	0	2.18
	T5	2.23 b	1822.9	0	2.05

注 (Note): T1—不施肥 No fertilization; T2—普通尿素 2/3 基施、1/3 追施 Urea, 2/3N was applied as basal and 1/3N as topdressing; T3—1/3 控释尿素 + 1/3 普通尿素基施, 1/3 普通尿素氮追施 2/3 N (half CRU and half urea) basal applied, and 1/3 N in urea top-dressed; T4—2/3 控释尿素 + 1/3 普通尿素一次基施 Total N basal applied in one time (2/3 CRU + 1/3 urea); T5—控释尿素一次基施 Total N basal applied in one time (100% CRU). 尿素 Urea—2100 yuan/t; 控释尿素 CRU—3500 yuan/t; 玉米籽粒 Grain of maize—1700 yuan/t (2017)、1600 元 yuan/t (2018); 人工成本 Labor cost—450 yuan/hm²; 同列数值后不同小写字母表示同一年份不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different lowercase letters in a column are significantly different among treatments in the same year ($P < 0.05$).

25.8%、36.9%、36.6%、32.7%，2018 年 T3、T4 处理的相对增收率分别为 9.7%、10.3%，T2、T5 处理的相对增收率为 4.5%、5.1%。综合比较两年经济效益，每年各处理间的差异达到显著水平 ($P < 0.05$)，以 T3、T4 处理效果较优。T4 处理虽然增加了肥料成本，但其产量高，同时减少了追肥环节劳动力的

投入，相对收益最佳。说明在施氮量为 225 kg/hm² 时，普通尿素与控释尿素以 1 : 2 比例一次基施，可以同时达到增加玉米产量和经济效益的目的。

2.4 玉米产量与土壤不同形态氮、土壤酶活性的主成分分析

产量与土壤不同形态氮、土壤酶活性的主成分

分析, 通过三次回归模拟, 其贡献率达到 89.06%, 第一主成分中贡献率较高的指标是土壤硝态氮和无机氮, 第二主成分中贡献较高的是土壤脲酶活性, 在第一、第二主成分中土壤碱性磷酸酶活性的系数均为负值, 在一定程度说明其对产量的贡献较小(表 8)。由此说明, 土壤硝态氮对玉米产量的影响较大。综合得分 T1、T2、T3、T4、T5 处理分别为-5.38、-1.99、-1.24、5.38、1.47, 其中以 T4 处理最优。

3 讨论

3.1 普通尿素与控释尿素配施对土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、无机氮含量的影响

有学者通过研究普通/控释尿素配施对水稻田土壤养分的影响发现, 普通尿素与控释尿素掺混后, 会使土壤硝态氮、铵态氮和碱解氮含量维持在较高水平, 有利于水稻中后期氮素供应^[14]。杨雯玉等^[22]通过研究普通尿素与控释尿素配施对冬小麦的生长影响表明, 普通尿素与控释尿素配施可以降低土壤中硝态氮的含量, 增加氮素利用效率, 增加产量, 这与本研究的结果基本一致。本研究表明, 在施入纯氮 225 kg/hm²时, 普通尿素与控释尿素以 1 : 2 的比例一次性基施或是普通尿素与控释尿素 1/3 : 1/3 基施并在玉米拔节期追施 1/3 的普通尿素更有利于玉米的高产, 主要因为其在玉米灌浆期能够持续供应养分。说明在这两种施肥条件下玉米的需氮水平与土壤供应氮素的能力基本吻合, 从而提高玉米产量。

从土壤铵态氮、硝态氮、无机态氮含量对普通尿素与控释尿素的响应可以看出, T2 与 T5 处理

3 种状态氮的含量变化规律正好相反, T2 处理在玉米生育前期各种形态的氮素水平相对处于较高水平, 且在玉米生育中期较深土层的土壤硝态氮、无机氮含量明显高于同时期的其他施氮处理。T5 处理在玉米生育前期的氮素水平相对较低, 中后期土壤中各种形态的氮素释放, 这与李泽丽等^[23]在小麦上应用控释尿素的变化规律基本一致。土壤无机氮含量一方面与作物的吸收有一定的关系, 同时与土壤的微环境有一定的关系, 在等氮素养分投入的情况下, 在玉米成熟期, 各处理间土壤无机氮含量差异显著, 除与控释肥养分释放缓慢的特性相关外, 土壤无机氮含量与土壤微生物固定的氮也有一定的关系, 这也是需要进一步研究的内容。普通尿素 (T2) 处理由于本身的速效性, 使得前期土壤硝态氮含量相对较高。而 T3、T4 处理在玉米生育期内对土壤硝态氮含量的控制较好, 能够持续供应玉米生长发育所需的氮素养分。说明普通尿素与控制尿素配施更有利于土壤无机氮的供应, 与王寅等^[10]的研究结果相近。

3.2 普通尿素与控释尿素配施对土壤酶活性的影响

脲酶广泛存在于土壤中, 是一种分解酰胺氮的酶, 能促进有机质分子中肽键的水解, 促进尿素水解生成 NH_3 、 CO_2 和水, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 又是植物主要氮素来源之一^[24]。人们常用土壤脲酶活性表征土壤的氮素转化状况。张敬昇等^[25]研究表明, 控释氮素掺混普通尿素, 掺混 40% 以上控释尿素能明显提升稻、麦生育中后期土壤脲酶活性, 刺激土壤脲酶与蛋白酶参与氮素转换, 促进了土壤氮素有效性, 与本试验的研究结果基本相符。本试验研究表明, 普通尿素与

表 8 主成分特征值
Table 8 The eigenvalue of principal components

项目 Item	PC1	PC2	PC3
特征值 Eigenvalue	1.74	1.36	1.17
贡献率 Contribution rate (%)	43.08	26.51	19.47
累计贡献率 Cumulative contribution (%)	43.08	69.59	89.06
产量 Yield	0.34	0.49	-0.09
土壤硝态氮 Soil $\text{NO}_3\text{-N}$	0.55	0.02	0.13
土壤铵态氮 Soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$	0.22	-0.23	-0.72
土壤无机氮 Soil inorganic N	0.55	-0.07	-0.10
土壤脲酶 Soil urease	-0.06	0.54	-0.53
土壤碱性磷酸酶 Soil alkaline phosphatase	-0.11	-0.59	-0.34
土壤过氧化氢酶 Soil catalase	0.47	-0.25	0.23

控释尿素配施可以调节 0—40 cm 土层土壤脲酶活性。脲酶活性在一定程度上反映尿素的分解水平,脲酶活性较高说明分解氮素的水平较高,进而维持土壤供应氮素的水平,改善土壤肥力。在降雨较多的月份,降雨在一定程度上会降低土壤温度,并使得无机氮素养分稀释、下渗,使得脲酶转化酰胺态氮素的速率增加。中后期 T3、T4 处理的脲酶活性相对稳定,说明普通尿素与控释尿素配施在一定程度上会影响脲酶活性。总体而言, T3、T4 处理土壤脲酶活性相对平稳,说明普通尿素与控释尿素配施在玉米生长发育中后期对土壤 0—40 cm 土层的土壤脲酶活性有一定的提升。

碱性磷酸酶 (ALP 或 AKP) 是一组水解酶类,这组酶在碱性条件下具有较高的活力,在 pH 4~9 的土壤中均有磷酸酶,磷酸酶对土壤磷素的有效性具有重要作用^[26-27]。本试验研究表明,在玉米生育期内 0—20 cm 土层土壤碱性磷酸酶活性在不同处理间差异显著,玉米生育中后期 T4 的碱性磷酸酶活性高于 T2 处理,说明控释尿素的施入可以提高玉米中后期土壤碱性磷酸酶的活性。20—40 cm 土层土壤碱性磷酸酶活性变化趋势与 0—20 cm 土层变化趋势一致。从不同时期的表现来看,在同一氮素水平下随着控释尿素比例的增加,土壤碱性磷酸酶活性逐渐升高,但到达峰值所用时间因控释尿素的施入量不同而异,说明控释尿素可调节土壤中的养分供应。

过氧化氢酶广泛存在于土壤中和生物体内,其可以将过氧化氢分解 (分解为分子氧和水),有利于防止过氧化氢对生物体的毒害作用,它与有机质和微生物数量有关,一般认为,土壤肥力因子与过氧化氢酶活性成正比^[28]。本试验通过测定土壤过氧化氢酶活性,了解了土壤中过氧化氢酶活性的高低,土壤过氧化氢酶活性较高时,可以缓解植株根系的“自毒”现象,使根系对土壤无机氮持续吸收,进而减少植株因过氧化氢积累而使得功能根系失活,影响植株正常生长,在玉米生育前期 T3、T4 处理的土壤过氧化氢酶活性较高,在玉米生育后期 T4、T5 处理的土壤过氧化氢酶活性较高。

综上所述,土壤酶活性会受土壤无机氮含量变化的影响而略有差异,在玉米花期及之后各生育期,土壤脲酶、土壤碱性磷酸酶活性与土壤无机氮含量的变化趋势一致,有可能是由于土壤无机氮的释放改变了土壤微环境,进而导致碱性磷酸酶的活性发生变化,也有可能是由于土壤微生物及根系分泌物对碱性磷酸酶活性造成的影响。土壤过氧化氢

酶活性的变化趋势与土壤无机氮含量的变化趋势不同,但从植物根系对无机氮的吸收而言,碱性磷酸酶活性越高,越有利于植株对无机氮的吸收。

3.3 普通尿素与控释尿素配施对玉米产量的影响

玉米产量的高低除受自身遗传特性影响外,还受栽培措施、地理位置、农田微环境的影响。前人对控释肥料与玉米产量之间的关系已经做了较多的研究,朱荣^[29]在旱地研究表明,普通尿素与控释尿素配施可以提高玉米产量和经济效益,这与本研究结果一致;姬景红等^[30]研究表明,普通尿素与控释尿素以 40% 和 60% 的比例混合施用可以提高玉米产量,且能提高氮素利用效率;李玮等^[31]通过研究基施缓释尿素与普通尿素表明,缓释尿素处理持续供应氮素能力更好,以缓释尿素 50% 作基肥的处理玉米产量及氮肥利用率较高;周勇明等^[32]研究海藻酸尿素对夏玉米产量和氮肥利用率的影响表明,在施纯氮 180 kg/hm² 水平下,海藻酸尿素可显著提高玉米产量。王忠孝等^[33]研究相关文献表明,产量在 7500~9000 kg/hm²,其氮素吸收量为 165~225 kg,产量在 10500~13500 kg/hm²,其氮素吸收量为 225~270 kg,因此要使玉米达到高产,就需要一定的氮素作为基础,进而发挥品种的生产潜力。邵国庆等^[34]研究表明,与常规尿素处理相比,控释尿素处理花前根系数量、活性和根冠比均较低,但花后三者能维持较高水平,更有利于产量形成。郭金金等^[35]研究发现,尿素与缓释氮肥掺混时,施氮量为 180 kg/hm² 是玉米高效生产的最佳施氮量,表明尿素与缓释肥 3:7 掺混对玉米的生长指标、干物质累积量、产量及产量构成要素都有显著的影响。

本试验研究表明,与不施肥料、单施普通尿素、单施控释尿素相比,普通尿素与控释尿素配施条件下的玉米产量及产量构成要素均表现较好,两年产量和氮素利用效率差异明显,主要原因是由于两年的降雨量差异明显,对于旱作区的玉米种植,限制玉米高产的因素主要是水分供应,但水分的多少人为不可控制,而从作物产量的角度考虑,普通尿素与控释尿素配施对宁夏南部山区覆膜春玉米产量、效益有一定的提高,其中以 T4 处理最优。

4 结论

在施 N 225 kg/hm² 的前提下,普通尿素与控释尿素以 1:2 的比例混合一次性基施,不仅可以保证玉米中后期耕层土壤 (0—40 cm 土层) 具有较高的无

机氮含量、土壤酶活性, 而且由于无需进行追肥, 获得了最佳产量、肥效和经济效益。

参 考 文 献:

- [1] 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研究 I. 冬小麦[J]. *生态学报*, 2001, 21(11): 1782–1789.
Zhou S L, Zhang F S, Wang X R. Studies on the spatio-temporal variations of soil NO_3^- -N and apparent budget of soil nitrogen I. Winter wheat[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(11): 1782–1789.
- [2] Olfs H W, Blankenau K, Brentrup F, *et al.* Soil- and plant-based nitrogen-fertilizer recommendations in arable farming[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2005, 168(93): 414–431.
- [3] 纪德智, 王端, 赵京考, 等. 不同氮肥形式对玉米氮、磷、钾吸收及氮素平衡的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(4): 104–109.
Ji D Z, Wang D, Zhao J K, *et al.* Effects of different nitrogen forms on nitrogen, phosphorus and potassium uptake and nitrogen balance in maize[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(4): 104–109.
- [4] 米国华, 陈范骏, 春亮, 等. 玉米氮高效品种的生物学特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(1): 155–159.
Mi G H, Chen F J, Chun L, *et al.* Biological characteristics of nitrogen efficient maize genotypes[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2007, 13(1): 155–159.
- [5] 张卫峰, 马林, 黄高强, 等. 中国氮肥发展、贡献和挑战[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(15): 3161–3171.
Zhang W F, Ma L, Huang G Q, *et al.* The development and contribution of nitrogenous fertilizer in China and challenges faced by the country[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(15): 3161–3171.
- [6] 吴发启, 赵晓光, 刘秉正, 等. 中国西部生态环境建设[J]. *水土保持研究*, 2000, 7(1): 2–5, 22.
Wu F Q, Zhao X G, Liu B Z, *et al.* Ecological environment construction in the west parts of China[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2000, 7(1): 2–5, 22.
- [7] 范霞, 张吉旺, 任佰朝, 等. 不同株高夏玉米品种的氮素吸收与利用特性[J]. *作物学报*, 2014, 40(10): 1830–1838.
Fan X, Zhang J W, Ren B C, *et al.* Nitrogen uptake and utilization of summer maize hybrids with different plant heights[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(10): 1830–1838.
- [8] 王科, 赵亚妮, 王佳锐, 等. 施氮及种植模式对玉米氮素利用效率和土壤硝态氮含量的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(4): 121–126.
Wang K, Zhao Y N, Wang J R, *et al.* Effects of nitrogen application and planting patterns on nitrogen utilization efficiency of maize and soil nitrate content[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(4): 121–126.
- [9] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 915–924.
Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, *et al.* Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 915–924.
- [10] 王寅, 冯国忠, 张天山, 等. 基于产量、氮效率和经济效益的春玉米控释氮肥掺混比例[J]. *土壤学报*, 2015, 52(5): 1153–1165.
Wang Y, Feng G Z, Zhang T S, *et al.* Optimizing blending ratio of controlled release N fertilizer for spring maize based on grain yield, N efficiency, and economic benefit[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(5): 1153–1165.
- [11] 李敏, 郭熙盛, 叶舒娅, 等. 控释尿素和普通尿素配施对夏玉米土壤无机氮转化的影响[J]. *河北农业科学*, 2009, 13(10): 32–34.
Li M, Guo X S, Ye S Y, *et al.* Effects of combined application of controlled-release urea and common urea on the inorganic nitrogen transformation in soil of summer maize[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2009, 13(10): 32–34.
- [12] 李玉浩, 何杰, 王昌全, 等. 控释氮肥配施尿素对土壤无机氮、微生物及水稻生长的影响[J]. *土壤*, 2018, 50(3): 469–475.
Li Y H, He J, Wang C Q, *et al.* Effects of controlled release nitrogen fertilizer combined with urea on soil inorganic nitrogen, microorganism and rice growth[J]. *Soils*, 2018, 50(3): 469–475.
- [13] 王素萍, 李小坤, 鲁剑巍, 等. 控释尿素与尿素配施对油菜籽产量、经济效益和土壤无机氮含量的影响[J]. *中国油料作物学报*, 2013, 35(3): 295–300.
Wang S P, Li X K, Lu J W, *et al.* Effects of combined application of urea and controlled-release urea on yield, profits of rapeseed and soil inorganic nitrogen[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2013, 35(3): 295–300.
- [14] 王晓琪, 朱家辉, 陈宝成, 等. 控释尿素不同比例配施对水稻生长及土壤养分的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(4): 178–182.
Wang X Q, Zhu J H, Chen B C, *et al.* Effects of different proportion of controlled-release urea on rice growth and soil nutrient[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(4): 178–182.
- [15] 郭新送, 丁方军, 陈士更, 等. 控释尿素配施微生物菌剂的氮肥利用率及土壤酶活性研究[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(2): 277–282.
Guo X S, Ding F J, Chen S G, *et al.* Study on nitrogen use efficiency and enzyme activities of combined application of controlled-release urea and microbial inoculants[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(2): 277–282.
- [16] Zheng W K, Zhang M, Liu Z G, *et al.* Combining controlled-release urea and normal urea to improve the nitrogen use efficiency and yield under wheat-maize double cropping system[J]. *Field Crops Research*, 2016, 197(4): 52–62.
- [17] 杜森, 高祥照. 土壤分析技术规范[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006, 40–51.
Du S, Gao X Z. Technical specifications for soil analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2006, 40–51.
- [18] 郭文森, 辛宇, 张金尧, 等. 全波长扫描式多功能读数仪-靛酚蓝比色法测定水样铵态氮含量[J]. *中国土壤与肥料*, 2018, (4): 166–170.
Guo W M, Xin Y, Zhang J Y, *et al.* Determination of ammonium in water by a microplate reader with indophenol-blue colorimetric method[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2018, (4): 166–170.
- [19] 樊军. 黄土高原旱地长期定位试验土壤酶活性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学硕士学位论文, 2001.
Fan J. Study on soil enzyme activities of a long-term experiment in Loess Plateau[D]. Yangling: MS Thesis of Northwest Agricultural and Forestry University, 2001.
- [20] 周礼恺, 张志明. 土壤酶活性的测定方法[J]. *土壤通报*, 1980, (5): 37–38, 49.
Zhou L K, Zhang Z M. Method for determination of soil enzyme

- activity[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1980, (5): 37–38, 49.
- [21] Moll R H, Kamprath E J, Jackson W. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization[J]. *Agronomy Journal*, 1982, 74(3): 562–564.
- [22] 杨雯玉, 贺明荣, 王远军, 等. 控释尿素与普通尿素配施对冬小麦氮肥利用率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(5): 627–633.
- Yang W Y, He M R, Wang Y J, *et al.* Effect of controlled-release urea combined application with urea on nitrogen utilization efficiency of winter wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2005, 11(5): 627–633.
- [23] 李泽丽, 刘之广, 张民, 等. 控释尿素配施黄腐酸对小麦产量及土壤养分供应的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(4): 959–968.
- Li Z L, Liu Z G, Zhang M, *et al.* Effects of controlled release urea combined with fulvic acid on wheat yield and soil physical and chemical properties[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(4): 959–968.
- [24] 李德斌. 氯嘧磺隆降解及其对土壤微生态影响的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学博士学位论文, 2012.
- Li D B. Degradation of chlorimuron-ethyl and its effect on microecology[D]. Harbin: PhD Dissertation of Northeast Forestry University, 2012.
- [25] 张敬昇, 王昌全, 李冰, 等. 控释掺混尿素对稻、麦土壤氮与酶活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(6): 1899–1908.
- Zhang J S, Wang C Q, Li B, *et al.* Effects of controlled release blend bulk urea on soil nitrogen and soil enzyme activity in wheat and rice fields[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(6): 1899–1908.
- [26] 张恩和, 张新慧. 不同生长年限啤酒花土壤酶活性的研究[J]. *草业学报*, 2010, 19(6): 35–40.
- Zhang E H, Zhang X H. Soil enzyme activity in the rhizosphere of *Humulus lupulus* plants of different ages[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2010, 19(6): 35–40.
- [27] 崔雯雯, 宋全昊, 高小丽, 等. 糜子不同种植方式对土壤酶活性及养分的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(1): 234–240.
- Cui W W, Song Q H, Gao X L, *et al.* Influence of different cropping patterns on soil enzyme activities and yield of broomcorn millet[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(1): 234–240.
- [28] 程国玲. 矿物油污染土壤的菌根生物修复研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学博士学位论文, 2004.
- Cheng G L. Study on mycorrhizal bioremediation of mineral oil contaminated soil[D]. Harbin: PhD Dissertation of Northeast Forestry University, 2004.
- [29] 朱荣. 旱地地膜春玉米养分积累及产量形成对氮肥运筹的响应[D]. 银川: 宁夏大学硕士学位论文, 2017.
- Zhu R. Response of nitrogen application schemes on the nutrient accumulation and yield formation of film mulched spring maize on dry land[D]. Yinchuan: MS Thesis of Ningxia University, 2017.
- [30] 姬景红, 李玉影, 刘双全, 等. 控释氮肥对春玉米产量、氮效率及氮素平衡的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2017, 34(2): 153–160.
- Ji J H, Li Y Y, Liu S Q, *et al.* Effects of controlled-release urea on grain yield of spring maize, nitrogen use efficiency and nitrogen balance[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(2): 153–160.
- [31] 李玮, 翟勇, 冶军, 等. 缓释尿素对滴灌玉米农田土壤无机氮及产量的影响[J]. *玉米科学*, 2016, 24(3): 131–137.
- Li W, Zhai Y, Ye J, *et al.* Effect of slow-release urea on soil inorganic N and the yield of maize under drip irrigation[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2016, 24(3): 131–137.
- [32] 周勇明, 商照聪, 宝德俊, 等. 海藻酸尿素对夏玉米产量和氮肥利用率的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2014, (5): 23–26.
- Zhou Y M, Shang Z C, Bao D J, *et al.* Effect of applying alginic acid urea on summer maize yield and N use efficiency[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2014, (5): 23–26.
- [33] 王忠孝, 王庆成, 牛玉贞, 等. 夏玉米高产规律的研究 Ⅲ. 高产栽培途径和措施[J]. *山东农业科学*, 1990, 2(2): 6–9.
- Wang Z X, Wang Q C, Niu Y Z, *et al.* Studies on high-yield regularity of summer maize Ⅲ. High-yield cultivation ways and measures[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 1990, 2(2): 6–9.
- [34] 邵国庆, 李增嘉, 宁堂原, 等. 不同水分条件下常规尿素和控释氮肥对玉米根冠生长及产量的影响[J]. *作物学报*, 2009, 35(1): 118–123.
- Shao G Q, Li Z J, Ning T Y, *et al.* Effects of normal urea and release-controlled urea on root and shoot growth and yield of maize in different water conditions[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(1): 118–123.
- [35] 郭金金, 张富仓, 王海东, 等. 不同施氮量下缓释氮肥与尿素掺混对玉米生长与氮素吸收利用的影响[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(20): 3930–3943.
- Guo J J, Zhang F C, Wang H D, *et al.* Effects of slow release nitrogen fertilizer and urea blending on maize growth and nitrogen uptake and utilization under different nitrogen application rates[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(20): 3930–3943.