

控释氮肥比例对土壤氮含量和玉米氮素吸收利用的影响

金容¹, 李兰², 郭萍¹, 孔凡磊¹, 袁继超¹

(1. 四川农业大学农学院, 农业部西南作物生理生态与耕作重点实验室, 成都 611130; 2. 成都市农林科学院, 成都 611130)

摘要: 通过大田试验, 研究相同氮肥施用量的条件下, 不同比例控释尿素与普通尿素混合施用对土壤氮含量、玉米植株氮素吸收利用及产量的影响。结果表明: 施氮显著提高了 0—20, 20—40 cm 耕层土壤碱解氮和全氮含量。全施普通尿素时, 一次施肥可提高前期土壤氮含量, 而 2 次施肥则有利于提高后期土壤氮含量; 与普通尿素施肥相比, 掺混一定比例的控释尿素一次性底施可显著提高各生育时期耕层土壤含氮量。适宜比例的控释尿素与普通尿素掺混施用可在一定程度上增加玉米中后期的氮素积累量, 提高氮肥表观利用率、氮肥农学效率和肥料贡献率以及玉米功能叶关键酶活性, 在相同氮肥水平下, 其一次性底施的效果甚至超过普通尿素 2 次施用。随控释尿素比例的增加, 玉米产量呈先增后减趋势, 以 75% 控释尿素 + 25% 普通尿素处理产量最高, 比普通尿素一次施增产 12.09% (2014 年) 和 21.58% (2015 年), 比普通尿素 2 次施肥增产 8.27% (2014 年) 和 14.19% (2015 年)。因此, 普通尿素掺混 75% 比例的控释尿素进行一次底施, 不仅能够协调在整个玉米生育期土壤对氮素的供应, 实现玉米的有效增产, 而且还能够减少施肥次数和劳力投入。

关键词: 普通尿素; 控释肥; 土壤氮; 氮积累; 氮素利用; 关键酶活性

中图分类号: S513; S143.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)06-0214-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.06.031

Effects of the Mixed Ratios of Controlled-Release Nitrogen Fertilizer on Soil Nitrogen Content and Its Uptake and Utilization of Maize

JIN Rong¹, LI Lan², GUO Ping¹, KONG Fanlei¹, YUAN Jichao¹

(1. College of Agronomy, Sichuan Agricultural University, Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology, and Cultivation in Southwest, Ministry of Agriculture, Chengdu 611130; 2. Chengdu Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Chengdu 611130)

Abstract: A field experiment was carried out to study the effects of different mixed ratios of controlled-release urea (CRU) and conventional urea (CU) on soil nitrogen content, its uptake and utilization of maize (*Zea mays* L.) and grain yield. All treatments were applied with the same rate of nitrogen. The results showed that nitrogen fertilization significantly increased soil available nitrogen and total nitrogen contents in tillage layers of 0—20 cm and 20—40 cm. When using conventional urea, single basal application increased soil nitrogen content in the early growth stage, while twice application could improve the nitrogen content in the late growth stage. Compared with the conventional urea application, the single basal application of urea with a certain proportion of controlled-release urea significantly improved soil nitrogen content in tillage layer in each growth period. The suitable proportion of controlled-release urea mixed with conventional urea increased the nitrogen accumulation in maize in the middle and later stages to some extent, improved the apparent utilization rate of nitrogen fertilizer, the efficiency of nitrogen fertilizer, fertilizer contribution and the key enzymes activities of nitrogen metabolism in function leaves. At the same nitrogen application rate, the effect of the single basal application of the mixed fertilizers was even better than the twice applications of conventional urea. With the increasing proportions of controlled-release urea, the maize yield first increased and then decreased, and the yield under the treatment of 75% controlled-release urea + 25% conventional urea was the highest, which was 12.09% (2014) and 21.58% (2015) higher than single basal application of

收稿日期: 2018-06-20

资助项目: 公益性行业(农业)科研专项(20150312705); 国家重点研发计划—玉米密植机收项目(2016YFD0300307); 国家重点研发计划—资源高效模式项目(2016YFD0300209)

第一作者: 金容(1992—), 女, 四川广安人, 在读硕士研究生, 主要从事作物高产优质高效栽培技术研究。E-mail: 1256100416@qq.com

通信作者: 袁继超(1963—), 男, 重庆江津人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事作物高产优质高效栽培技术研究。E-mail: yuanjichao5@163.com

conventional urea fertilizer, 8.27% (2014) and 14.19% (2015) higher than the twice fertilizations, respectively. Therefore, the conventional urea mixed with 75% controlled-release urea could not only harmonize the soil nitrogen supply throughout the maize growing period, but also reduce the times of fertilization, and consequently cut the labor input.

Keywords: conventional urea; controlled-release urea; soil nitrogen; nitrogen accumulation; nitrogen utilization; key enzyme activity

合理施用氮肥是提高玉米产量的重要技术措施^[1]。目前在北方许多地区玉米施肥多采用底肥一次施用方式,而南方地区则多采用传统的氮肥施用方式,即在底肥基础上进行多次追肥(尤其是攻穗肥),但田间追肥操作不便,工作量大,成本增加。因此,前人开展了底肥一次施用的试验研究,发现不同肥料不仅肥效的大小有差异,其肥效的长短也有差异^[2]。普通尿素的肥效快但持续时间相对较短,控释氮肥肥效较长,具有养分释放与作物需求同步,挥发、淋洗、固定少等优点,还能改善土壤性状,减轻环境污染,提高氮肥利用率,已成为新型肥料的研究热点^[3]。但控释氮肥存在价格偏高,应用范围受限^[4],前期可能出现因肥效慢而影响壮苗^[5]等问题,不一定能起到既增产又增收的效果^[6]。为解决上述问题,出现了较多将控释氮肥与其他肥料混合施用的相关研究^[7-8]。有研究^[5]表明,控释氮肥与普通尿素掺混施用不仅能提高经济收益,肥效还更加优于控释氮肥^[9]。有关控释氮肥与普通尿素混施对植株干物质积累、氮素利用效率和产量的研究报道较多^[3, 5, 7, 10-13],而对土壤氮含量及其与植株氮吸收、氮代谢和氮利用等方面的系统研究较为鲜见。本研究通过不同比例的控释氮肥和普通尿素混施,探讨了对土壤氮含量、玉米植株氮代谢关键酶及氮吸收利用和产量的影响,以期对控释氮肥的合理施用和推广应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与地点

试验于 2014 年 3 月 28 日至 2015 年 8 月 1 日分别在四川省简阳市芦葭镇英明村(30°28'N,104°51'E)和德阳市中江县合兴乡新建村(30°95'N,104°63'E)进行,简阳试验田耕层土壤质地为紫色壤土,pH 7.59,有机质含量 13.91 g/kg,碱解氮含量 40.9 mg/kg,速效磷含量 3.2 mg/kg,速效钾含量 129.3 mg/kg。中江试验田耕地为黄色壤土,pH 7.60,有机质含量 30.95 g/kg,碱解氮含量 71.03 mg/kg,速效磷含量 3.2 mg/kg,速效钾含量 67.1 mg/kg。玉米生育期间气温和降水量见图 1。由图 1 可知,在 2015 年玉米生长中后期干旱比较严重。供试玉米品种为正红 505(半紧凑型玉米,生育期为 118 天),控释尿素(含氮量 43%,包膜材料为树脂,控释期为 90 d)由山东金正大生态工程集团股份有限公司生

产;普通尿素(含氮量 46%)由山东农大肥业有限公司生产。氯化钾(含 K₂O 量为 60%);过磷酸钙(含 P₂O₅ 量为 12%),均为市售。

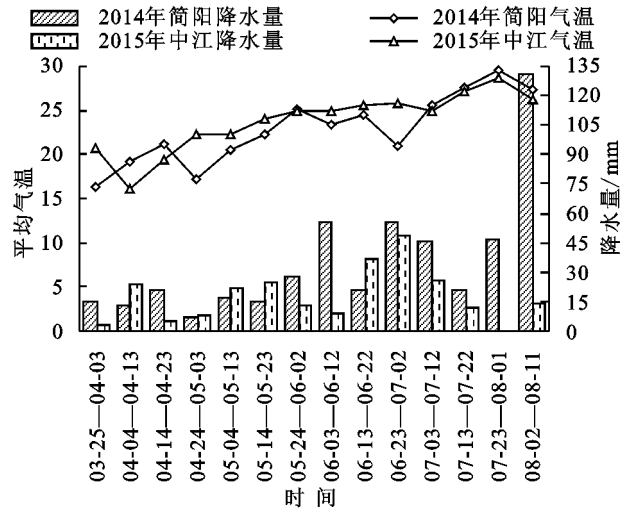


图 1 玉米生育期间气温和降水量

1.2 试验设计

本试验采用随机区组试验设计(表 1),3 次重复。宽窄行种植,宽行 1.6 m(简阳,2014 年)和 1.4 m(中江,2015 年),窄行 0.4 m,在窄行起垄覆膜撬窝穴播,株距 0.2 m,玉米种植密度分别为 50 000 株/hm² (2014 年)和 55 555 株/hm² (2015 年)。N、P₂O₅、K₂O 用量分别是 225,75,90 kg/hm²,各处理磷钾肥全部作底肥一次施入,氮肥除常规施肥(大面积生产上应用的施肥方法,氮肥底肥与攻穗肥比例为 6:4)外均一次性底施。其他栽培措施按当地高产要求进行。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤全氮和碱解氮含量 分别于大口期(追肥前)(5 月 27 日)、成熟期(8 月 1 日)于每小区 0—20,20—40 cm 土深垂直取样,风干后磨碎,采用碱解扩散法测定土壤碱解氮^[13];采用 BUCHI Distillation Unit K—355+Hanon T860 全自动电位滴定仪测定土壤全氮含量。

1.3.2 植株氮积累 分别于玉米拔节期(5 月 7 日)、吐丝期(6 月 11 日)、成熟期(8 月 1 日),每个小区选取代表性植株 5 株,按照叶片(含苞叶)、茎鞘(含叶鞘和穗轴)、雄穗和籽粒分开,放入烘箱中,105 ℃ 杀青 30 min,80 ℃ 烘干至恒重并称重,采用 BUCHI Distillation Unit K—355+Hanon T860 全自动电位滴定仪测定全氮含量,并计算植株氮积累量。

表 1 试验处理、养分用量及氮肥施用方案

处 理	处理	N/(kg·hm ⁻²)		P ₂ O ₅ / (kg·hm ⁻²)	K ₂ O/ (kg·hm ⁻²)
		底肥	攻穗肥		
CK	不施氮肥	0	0	75	90
常规施肥	普通尿素	135	90	75	90
CU100%	普通尿素 100%	225	0	75	90
CRU25%+CU75%	控释尿素 25%,普通尿素 75%	225	0	75	90
CRU50%+CU50%	控释尿素 50%,普通尿素 50%	225	0	75	90
CRU75%+CU25%	控释尿素 75%,普通尿素 25%	225	0	75	90
CRU100%	控释尿素 100%	225	0	75	90

注:CRU 为控释尿素;CU 为普通尿素。

1.3.3 氮代谢相关酶活性 分别于拔节期(5月7日)、吐丝期(6月11日)、灌浆期(7月6日),每小区选取5片代表性功能叶(吐丝期前取顶部第一全展开叶,叶丝及其以后取穗位叶),剪切叶片中部用液氮速冻后带回实验室进行分析测定。利用GS测试盒测定谷氨酰胺合成酶(GS)活性;参照Singh等^[14]的方法测定谷氨酸合酶(GOGAT)活性;参考吴良欢等^[15]的方法测定谷草转氨酶(GOT);参考Loulakakis等^[16]的方法测定谷氨酸脱氢酶(GDH)。

1.3.4 考种与计产 于玉米成熟期(8月1日),每个小区选取20个代表性果穗,调查穗长、穗粗、穗粒数、千粒重等产量构成因素,并按小区实收计产。

1.3.5 相关参数计算

氮肥农学效率(kg/kg)=(施肥区玉米产量-无肥区玉米产量)/施氮量

氮肥表观利用率(%)=(施氮肥区植株吸氮量-无肥区植株吸氮量)/施氮量×100%

氮收获指数(%)=籽粒吸氮量/植株吸氮量×100%

肥料贡献率(%)=(施肥区产量-无肥区产量)/施肥区产量×100%

1.4 数据处理

采用Excel 2010和Graph Pad Prism 5.0软件进行数据处理和作图,DPS 7.05软件进行统计分析和相关分析,采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD),在5%水平上对各处理的测定结果进行差异显著性检验,不同小写字母表示差异显著(P<0.05),图表中数据为平均值±标准误。其中土壤全氮含量为2014年数据,玉米叶片氮代谢关键酶活性为2015年数据,其余指标均为2年数据。

2 结果与分析

2.1 控释氮肥比例对耕层土壤碱解氮、全氮含量的影响

2.1.1 控释氮肥比例对耕层土壤碱解氮含量的影响 从图2可以看出,土壤碱解氮含量随土层深度增加而降低,从大口期到成熟期耕层土壤碱解氮含量明

显减少。施氮显著提高了耕层土壤碱解氮含量,2014年和2015年全部施氮处理平均碱解氮含量较不施氮处理(CK)在大口期0—20 cm土壤分别增加25.49%和39.60%,20—40 cm分别增加35.95%和12.02%;成熟期0—20 cm土壤分别增加29.22%和48.53%,20—40 cm分别增加47.18%和50.62%。一次性施肥时,与100%普通尿素相比,掺混控释尿素后均不同程度地提高了各生育时期耕层土壤的碱解氮含量,除2014年成熟期20—40 cm与2015年大口期0—20 cm外,土壤碱解氮含量有随控释尿素比例提高呈先增后降低的趋势,以CRU75%+CU25%处理最高,2014年成熟期20—40 cm与2015年大口期0—20 cm土壤碱解氮含量以CRU100%最高,其次为CRU75%+CU25%,表明掺混适宜的控释尿素可以显著提高土壤碱解氮含量,以CRU75%+CU25%较适宜。全施普通尿素时,总体而言,大口期一次底施(CU100%)的土壤解氮含量高于2次施肥(常规施肥),而成熟期则相反(2015年成熟期20—40 cm土层例外),表明一次施肥可提高前期土壤碱解氮含量,而2次施则有利于提高后期土壤碱解氮含量。

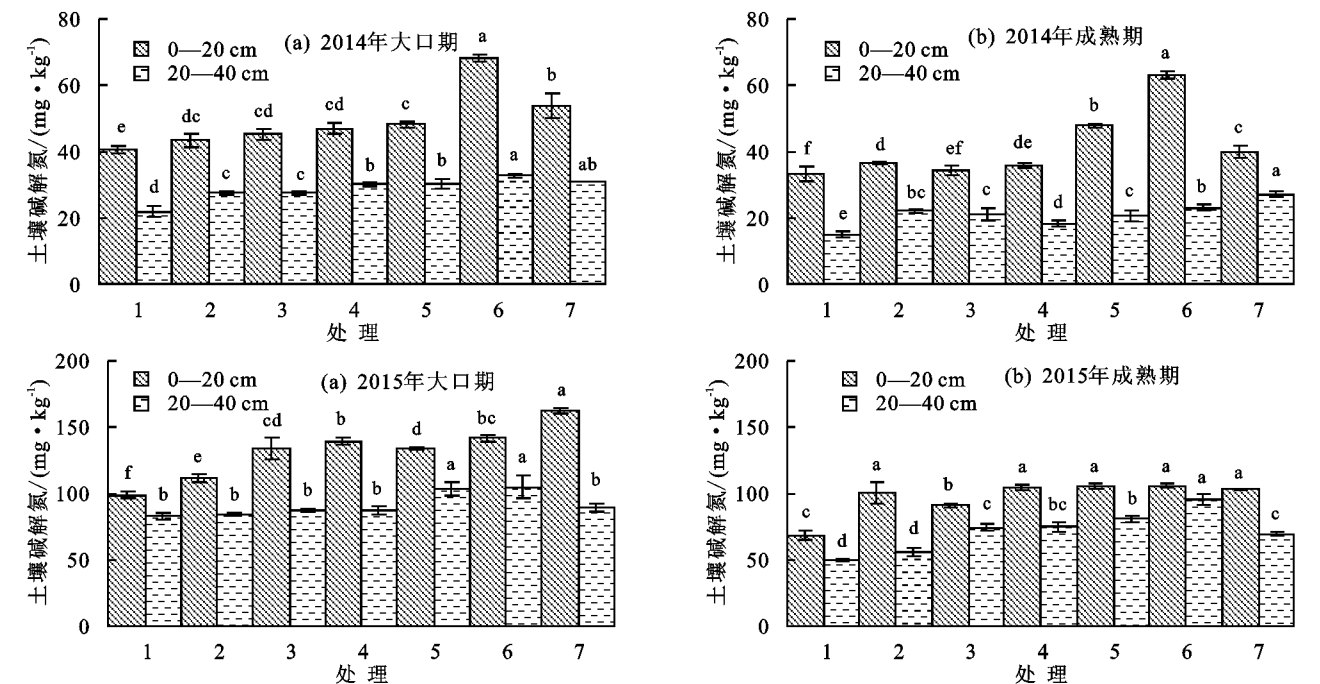
2.1.2 控释氮肥比例对耕层土壤全氮含量的影响 与土壤碱解氮变化一样,土壤全氮含量随土层深度增加而降低,从大口期到成熟期耕层土壤全氮含量明显减少(图3)。施氮显著提高了耕层土壤全氮含量,2014年全部施氮处理平均较不施氮处理(CK)大口期0—20 cm土壤全氮增加15.47%,20—40 cm增加35.06%;成熟期0—20 cm土壤全氮增加4.57%,20—40 cm增加51.73%。与碱解氮含量一样,掺混控释尿素能够提高耕层土壤的全氮含量,各生育时期耕层土壤的全氮含量随控释尿素比例的提高呈先升高后降低的趋势,均以CRU75%+CU25%处理最高。

2.2 控释氮肥比例对玉米植株氮素积累量和氮收获指数的影响

由表2可以看出,随生育进程推进,植株氮素积

累量逐渐增大,施氮显著提高了玉米各阶段氮素积累,不同施氮方式之间存在明显差异。均施普通尿素时,一次底施拔节期的氮积累量较 2 次施肥(常规施肥)高 24.53%(2014 年)和 9.52%(2015 年),但拔节

一吐丝和吐丝—成熟期 2 次施(常规施肥)则分别比一次施高 6.53%,22.17%(2014 年)和 11.49%,4.50%(2015 年),表明一次施有利于苗期生长,2 次施肥(常规施肥)则有利于中后期生长。



注:1 为 CK;2 为常规施肥;3 为 CU100%;4 为 CRU25%+CU75%;5 为 CRU50%+CU50%;6 为 CRU75%+CU25%;7 为 CRU100%;图中不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

图 2 不同施肥处理对土壤碱解氮含量的影响

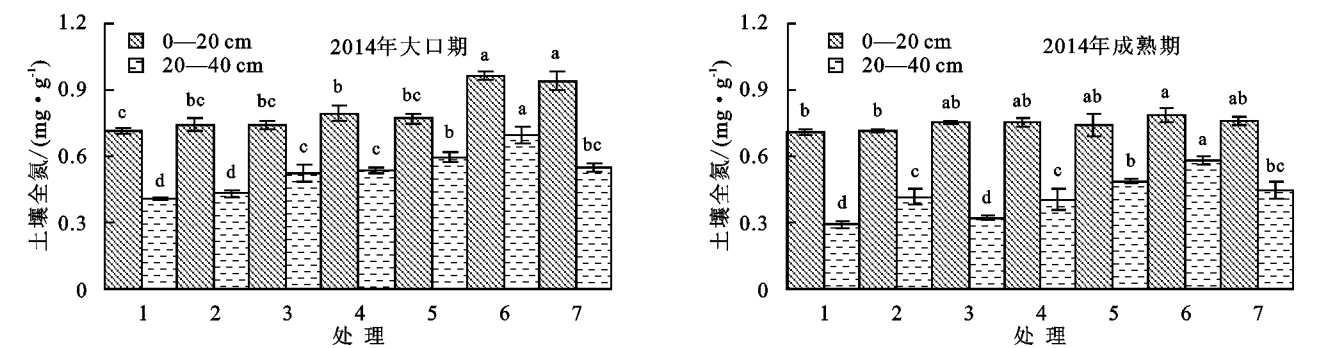


图 3 不同施肥处理对土壤全氮含量的影响

一次施肥时,掺混控释尿素可在一定程度上增加玉米的氮素积累量,尤其是吐丝期和成熟期,这 2 个时期的氮积累量均随控释尿素比例的提高而呈先增后降趋势,以 CRU75%+CU25%处理最高,高于普通尿素 2 次施用(常规施肥),2 年结果一致,表明掺混适宜的控释尿素能够增加玉米植株中后期氮素积累,延缓玉米叶片衰老。

氮收获指数反映植株氮素在籽粒中的分配情况,2015 年的氮收获指数小于 2014 年,这可能与 2015 年土壤黏重、肥力较高有关,表明干旱抑制了氮素向籽粒的转运。2 年的氮收获指数(y)随控释尿素比例(x)的提高而降低,二者间线性负相关,回归方程分别为 $y=63.12-0.0696x$ ($R^2=0.7957^*$) 和 $y=53.78-0.0900x$ ($R^2=0.9665^{**}$),2015 年随控释尿素比例

的提高下降的幅度更大。

2.3 控释氮肥比例对玉米产量和氮肥利用率的影响

由表 3 可以看出,2014 年试验土壤的碱解氮含量较 2015 年低,但玉米产量则较 2015 年高,平均高 36.96%,这与 2015 年中后期严重干旱有关(图 1)。施氮能显著提高玉米产量,2014 年和 2015 年全部施氮处理平均产量分别较不施氮处理(CK)增产 35.69%和 32.81%。均施普通尿素时,2 次施(常规施肥)的产量较一次施高,表明合理追肥有利于玉米高产。在一次施肥时,控释尿素与普通尿素配施较全施普通尿素和控释尿素增产。与吐丝期和成熟期氮素积累量一样,玉米产量随控释尿素比例的提高而先增后降,以 CRU75%+CU25%处理最高,比普通尿素一次施增产 12.09%(2014 年)和 21.58%(2015 年),比普通尿素 2 次施肥(常规施

肥)增产 8.27%(2014 年)和 14.19%(2015 年)。不同氮肥类型及其施用方法对氮肥的吸收利用也有显著影响,各处理间的氮肥农学效率、氮肥表观利用率和肥料贡献率与其产量的变化趋势一致,即适宜比例的控释尿素与普通尿素配施可以提高氮肥农学效率、氮肥表观利用率和肥料贡献率,在相同氮肥水平下,一次底肥施用的效果甚至超过了普通尿素 2 次施用的效果。

表 2 控释氮肥比例对各时期玉米植株氮素积累量和氮收获指数的影响 单位:kg/hm²

处理	2014 年				2015 年			
	拔节期	吐丝期	成熟期	氮收获指数/%	拔节期	吐丝期	成熟期	氮收获指数/%
CK	13.44±1.63c	70.01±2.45d	114.10±1.95e	62.37±0.92a	11.88±1.60c	77.62±2.70d	108.67±6.19d	59.78±0.58a
常规施肥	17.90±2.89b	114.09±2.89c	185.19±3.96c	62.09±2.53a	18.06±2.76ab	108.39±4.17ab	199.11±4.95bc	49.96±2.70b
CU100%	22.29±1.41a	112.58±0.82c	176.35±3.27d	62.15±2.56a	19.78±3.16ab	93.72±3.16bc	180.53±7.24c	54.06±3.57ab
CRU25%+CU75%	20.87±1.67ab	112.62±1.67c	186.90±4.84c	63.61±1.16a	18.06±4.06ab	92.68±4.06cd	192.52±4.06bc	51.72±0.71ab
CRU50%+CU50%	20.97±1.42ab	126.17±2.64b	203.32±3.45b	58.57±3.27b	19.29±2.22ab	98.38±3.69bc	205.71±3.57bc	48.88±2.83b
CRU75%+CU25%	21.32±2.88ab	131.55±1.40a	210.34±5.86a	57.21±2.45b	22.63±0.44a	116.14±3.01a	236.05±3.20a	46.13±3.38b
CRU100%	18.72±1.98b	129.27±0.71ab	210.40±0.71a	56.65±2.45b	15.93±1.29bc	93.71±1.41bc	220.63±2.56ab	45.60±2.37b

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下同。

表 3 控释氮肥比例对氮肥利用率与产量的影响

处理	2014 年				2015 年			
	氮肥农学效率/ (kg·kg ⁻¹)	氮肥表观 利用率/%	肥料 贡献率/%	产量/ (kg·hm ⁻²)	氮肥农学效率/ (kg·kg ⁻¹)	氮肥表观 利用率/%	肥料 贡献率/%	产量/ (kg·hm ⁻²)
CK	—	—	—	7334.23±258.96b	—	—	—	5458.17±71.03c
常规施肥	10.59±0.34ab	31.59±2.15c	24.55±1.08ab	9717.76±234.75a	6.21±2.03bc	40.20±2.64d	20.08±2.31bc	6855.70±182.91ab
CU100%	9.12±2.74b	27.67±0.87d	21.64±2.91b	9386.67±379.04a	4.36±1.05c	31.94±4.60d	15.12±3.04c	6438.90±217.80bc
CRU25%+CU75%	11.77±2.09ab	32.36±2.84c	26.43±4.15ab	9981.46±212.47a	7.64±0.89abc	37.27±5.51cd	23.89±2.05ab	7176.57±201.96ab
CRU50%+CU50%	13.07±3.08a	39.65±2.33b	28.38±5.35ab	10274.23±332.92a	9.85±2.69a	43.13±3.72bc	28.40±2.02a	7673.43±243.96a
CRU75%+CU25%	14.16±3.98a	42.77±3.47a	29.89±3.34a	10521.17±329.93a	10.54±1.56a	56.61±2.58a	30.15±1.62a	7828.70±135.97a
CRU100%	11.09±2.16ab	42.80±0.76a	23.61±4.91ab	9829.36±329.17a	9.17±3.93ab	49.76±2.35ab	26.40±2.47ab	7521.87±316.09a

2.4 控释氮肥比例对玉米叶片氮代谢关键酶活性的影响

由图 4 可知,随生育进程的推进,玉米叶片谷氨酰胺合成酶(GOGAT)活性总体呈先升后降趋势,而谷氨酰胺合成酶(GS)、谷草转氨酶(GOT)和谷氨酸脱氢酶(GDH)活性均呈上升趋势,且施氮能显著提高玉米功能叶氮代谢关键酶活性。均施普通尿素时,一次底施拔节期的 GS、GOGAT、GOT 和 GDH 活性较 2 次施肥(常规施肥)分别高 12.49%,7.77%,7.25%,5.80%,但吐丝期和灌浆期 2 次施(常规施肥)则分别比一次施高 4.66%,0.48%(GS),2.80%,5.36%(GOGAT)及 6.51%,1.39%(GOT)(2015 年),表明一次施肥有利于拔节期玉米氮代谢关键酶活性的提高,2 次施(常规施肥)可保证中后期玉米叶片中氮代谢系统的畅通和高效运转。

一次施肥时,与 100%普通尿素相比,掺混控释尿素后拔节—灌浆期玉米功能叶 GS、GOGAT、GOT 和 GDH 平均活性分别提高 14.04%,57.77%,22.52%,4.22%。除灌浆期 GS 和吐丝期 GOT 外,玉米功能叶氮代谢关键酶活性有随控释尿素比例提高呈先增后降的趋势,以 CRU75%+CU25%处理最高,且高于普通尿素 2 次施用(常规施肥),灌浆期 GS 和吐丝期 GOT

以 CRU100%最高,其次为 CRU75%+CU25%,表明适宜的控释氮肥比例能显著提高玉米功能叶氮代谢关键酶活性,有利于改善玉米对氮素的吸收能力,进而延缓氮素吸收能力的衰弱,以 CRU75%+CU25%较适宜。

2.5 土壤氮含量和植株氮吸收利用与氮素积累、产量之间的相关性

由表 4 可知,土壤碱解氮和全氮量与植株氮积累量正相关,相关系数在吐丝期和成熟期达显著水平(2015 年吐丝期 0—20 cm 相关系数未达显著水平),表明释放到土壤中的氮素可及时被作物吸收利用,有利于提高植株最终氮素积累;氮收获指数与各生育时期的氮积累量负相关,尤其是吐丝期和成熟期,相关系数达到显著水平,表明过多的氮素积累不利于其向籽粒转运,残留于茎叶中的氮素较多,表现为氮素冗余;氮肥的表观利用率、农学效率和贡献率均与玉米中后期的氮积累量正相关,特别是成熟期,相关系数达极显著水平(2014 年的氮肥农学效率和贡献率与氮积累量的相关系数未达显著水平),氮肥表观利用率与吐丝期氮积累量的相关系数也达到显著水平,表明增加玉米中后期氮积累量可提高氮肥的利用效率。

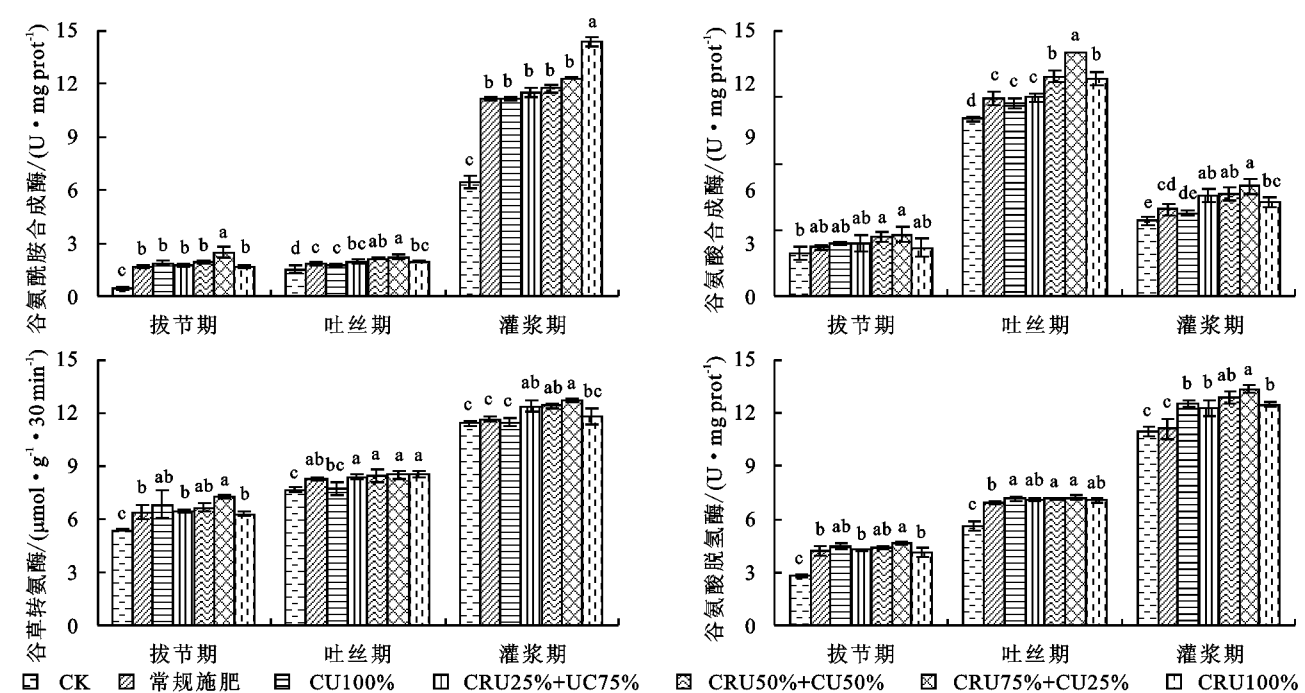


图 4 不同施肥处理对功能叶谷氨酰胺合成酶、谷氨酸合酶、谷草转氨酶和谷氨酸脱氢酶的影响

玉米籽粒产量与土壤碱解氮和全氮含量正相关, 相关系数达显著或极显著水平; 玉米籽粒产量与各生育时期氮积累量显著相关, 增加各生育时期的氮积累量有利于提高玉米产量; 玉米籽粒产量与氮肥的农学效率、表观利用率和贡献率正相关, 除 2014 年的表观利用率外相关系数均达极显著水平, 增加氮素积累通过提高玉米籽粒产量而提高肥料利用率

和贡献率。

从表 5 可以看出, 玉米功能叶氮代谢关键酶活性与玉米产量和氮积累量正相关, 相关系数均达显著或极显著水平, 不同生育期的相关系数不同, 功能叶关键酶活性与产量的最大相关系数均在吐丝期, 适当提高各生育时期功能叶氮代谢关键酶活性可增加玉米的氮素积累, 从而提高玉米产量。

表 4 土壤氮含量和植株氮吸收利用的相关性

指标	土层	2014 年	2014 年氮积累量			2015 年	2015 年氮积累量			
	深度/cm	产量	拔节期	吐丝期	成熟期	产量	拔节期	吐丝期	成熟期	
大口期	土壤碱解氮含量	0—20	0.60 **	0.39	0.65 **	0.63 **	0.70 **	0.30	0.26	0.75 **
		20—40	0.63 **	0.60 **	0.90 **	0.92 **	0.65 **	0.46 **	0.54 **	0.55 **
	土壤全氮含量	0—20	0.52 **	0.29	0.65 **	0.65 **	—	—	—	—
		20—40	0.70 **	0.54 **	0.73 **	0.70 **	—	—	—	—
成熟期	土壤碱解氮含量	0—20	0.58 **	0.31	0.59 **	0.57 **	0.89 **	0.53 *	0.65 **	0.91 **
		20—40	0.62 **	0.31	0.78 **	0.75 **	0.74 **	0.69 **	0.58 **	0.72 **
	土壤全氮含量	0—20	0.46 *	0.29	0.52 *	0.49 *	—	—	—	—
		20—40	0.73 **	0.54 **	0.77 **	0.78 **	—	—	—	—
氮收获指数		—0.39	—0.12	—0.45 **	—0.48 *	—0.67 **	—0.45 *	—0.59 **	—0.74 **	
氮肥农学效率		0.88 **	0.03	0.33	0.25	0.92 **	0.00	0.21	0.59 **	
氮肥表观利用率		0.42	0.04	0.91 **	0.99 **	0.62 **	0.25	0.51 *	0.92 **	
肥料贡献率		0.89 **	—0.07	0.29	0.21	0.98 **	0.08	0.31	0.74 **	
产量		1.00 **	0.66 **	0.91 **	0.90 **	1.00 **	0.49 *	0.65 **	0.89 **	

注: * 和 ** 分别表示 0.05 和 0.01 水平上差异显著。下同。

表 5 2015 年土壤氮代谢关键酶活性与产量和氮积累量的相关性

指标	拔节期				吐丝期			
	GS	GOGAT	GOT	GDH	GS	GOGAT	GOT	GDH
产量	0.77 **	0.45 *	0.61 **	0.73 **	0.81 **	0.84 **	0.80 **	0.79 **
氮积累量	0.73 **	0.43 **	0.48 **	0.72 **	0.67 **	0.72 **	0.43 *	0.65 **

3 讨论

不同的氮肥类型及其施用方法对氮肥的吸收利用具有显著影响^[17]。普通尿素前期释放较快, 但易

淋溶流失^[18], 肥效期相对较短^[19], 一般需要多次追肥。本试验中, 在相同施肥量条件下, 普通尿素底肥一次施用时前期生长较好, 拔节期氮积累量较高, 但

中后期氮积累量不如 2 次施肥(常规施肥)处理,特别是在干旱的 2015 年,表明普通尿素不适宜一次底施,在足量底肥基础上适量追施氮肥有利于改善玉米各生育阶段的氮素营养,从而提高玉米产量。

本试验中底肥一次施用,拔节期的氮积累量 100%控释尿素处理均不如 100%普通尿素,但中后期(拔节—吐丝和吐丝—成熟)则相反,表明控释肥的肥效较长,但前期释放较慢^[20],不利于培育壮苗。适宜比例的普通尿素与控释尿素掺混施用可以满足玉米各生育阶段对氮素的需求,增加氮素吸收积累,从而提高氮肥利用率^[21-22],但前人对控释尿素适宜的掺混比例的研究结果不尽一致,从 50%到 75%不等^[5,20,23-24]。本试验中底肥一次施用,控释尿素与普通尿素配施的处理玉米生育前期的氮积累量均高于 100%控释尿素处理,中后期的氮积累量又均高于 100%普通尿素处理,氮积累总量和氮肥农学效率及肥料贡献率均随控释尿素比例的增加而先增后减,以 CRU75%+CU25%配施处理最高。这可能与较高控释尿素比例能提高各阶段叶片氮代谢关键酶(GS、GOGAT、GOT 和 GDH)活性,增强玉米氮素同化能力有关,而全控释尿素比例(100%CRU)不利于植株氮素积累。同时试验表明,适宜的控释尿素掺混比例能够均衡玉米各生育阶段的营养,促进中前期生长、延缓后期衰老,从而增加氮素吸收积累,为玉米产量的提高奠定重要基础。试验结果与姬景红等^[4]的研究基本一致,但本试验还得出在相同施氮水平下,掺混控释尿素一次底施的效果好于普通尿素 2 次施用(常规施肥),进一步证实和完善了前人的研究结果。

此外,掺混控释尿素对玉米产量的影响也因地力水平而异^[25]。本试验中 2015 年中江试验地属于高地力水平,2014 年简阳试验地属于低地力水平,但 2014 年平均产量比 2015 年高 36.96%,这可能与 2015 年玉米生长期出现的阶段性干旱尤其是后期严重干旱有关,说明包膜控释肥料的养分释放速率会明显受到水分的影响^[26]。但控释掺混肥处理对 2 年产量的影响基本一致,与氮素积累变化趋势相同,即 2014 年和 2015 年各控氮比处理玉米产量均随控释尿素比例的增加而先增后减,以 CRU75%+CU25%处理产量最高,且高于普通尿素 2 次施肥(常规施肥)处理。这与黄淮海平原地区李伟等^[20]的研究结果相似,但得出的最佳配比不同,李伟等^[20]得出控释尿素与普通尿素的掺混比例为 1:1 时产量最佳,原因主要是试验地区与试验设计中控释尿素掺混比例不同,同时最佳控氮比也因控释尿素材料等而异。

施肥是通过改善土壤营养而影响作物生长发育的^[27],本试验中施肥处理均不同程度地提高了大喇叭

口期和成熟期 0—20,20—40 cm 土层的碱解氮和全氮量,各处理间 0—20,20—40 cm 土层的碱解氮和全氮量的变化趋势与其氮积累量和玉米籽粒产量基本一致,成熟期氮积累量和籽粒产量与大喇叭口期和成熟期 0—20,20—40 cm 土层的碱解氮和全氮量显著或极显著正相关,同时,玉米功能叶氮代谢关键酶活性与玉米产量和氮积累量正相关,相关系数均达显著或极显著水平,总的表明适宜比例的控释尿素与普通尿素掺混施用提高玉米产量的原理是提高了各生育时期土壤碱解氮和全氮量,增强了氮代谢关键酶活性以促进植株对氮素的同化能力,进而增加玉米氮素积累。

4 结论

2 年 2 点的田间试验表明,在相同施氮量条件下,普通尿素 2 次分施的氮积累总量和籽粒产量均高于一次底施;适宜比例的控释尿素与普通尿素掺混施用可以提高 0—20,20—40 cm 土层的碱解氮和全氮量,提高玉米功能叶氮代谢关键酶活性以及氮肥利用效率,增加中后期玉米氮素的吸收积累,最终提高玉米籽粒产量,其一次性底施的效果甚至超过普通尿素底肥+攻穗肥 2 次施用,即在本试验条件下适宜比例的控释掺混肥可以一次性底施,减少施肥次数和劳力投入,控释尿素与普通尿素的适宜比例为 75:25。

参考文献:

- [1] 安江勇,肖厚军,秦松,等.不同施肥量对贵州高产玉米养分吸收、生物性状、产量及品质的影响[J].中国土壤与肥料,2016(3):73-79.
- [2] 彭玉,孙永健,蒋明金,等.不同水分条件下缓/控释氮肥对水稻干物质质量和氮素吸收、运转及分配的影响[J].作物学报,2014,40(5):859-870.
- [3] 衣文平,朱国梁,武良,等.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[J].植物营养与肥料学报,2010,16(6):1497-1502.
- [4] 姬景红,李玉影,刘双全,等.控释掺混肥对春玉米产量、光合特性及氮肥利用率的影响[J].土壤通报,2015,46(3):669-675.
- [5] 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.
- [6] 王素萍,李小坤,鲁剑巍,等.施用控释尿素对油菜籽产量、氮肥利用率及土壤无机氮含量的影响[J].植物营养与肥料学报,2012,18(6):1449-1456.
- [7] 衣文平,史桂芳,武良,等.不同释放期包膜控释尿素与普通尿素配施在夏玉米上的应用效果研究[J].植物营养与肥料学报,2010,16(4):931-937.
- [8] 李伟,李絮花,董静,等.冬小麦控释尿素与普通尿素的最佳配比研究[J].植物营养与肥料学报,2014,20(3):629-635.
- [9] 李伟,李絮花,唐慎欣,等.控释掺混肥对夏玉米产量及

- 土壤硝态氮和铵态氮分布的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(6): 68-71.
- [10] 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.
- [11] 王寅, 冯国忠, 张天山, 等. 控释氮肥与尿素混施对连作春玉米产量、氮素吸收和氮素平衡的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(3): 518-528.
- [12] Li M, Wang D Z, Guo X S, et al. Effects of controlled-release nitrogen on yield and nitrogen use efficiency of summer maize [J]. Agricultural Science & Technology, 2017, 18(4): 607-610.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 56-58.
- [14] Singh R P, Srivastava H S. Increase in glutamate synthase (NADH) activity in maize seedlings in response to nitrate and ammonium nitrogen [J]. Physiologia Plantarum, 1986, 66(3): 413-416.
- [15] 吴良欢, 蒋式洪, 陶勤南. 植物转氨酶(GOT和GPT)活度比色测定方法及其应用[J]. 土壤通报, 1998, 29(3): 41-43.
- [16] Loulakis C A, Roubelakis-Angelakis K A. Intracellular localization and properties of NADH-glutamate dehydrogenase from *Vitis vinifera* L.: Purification and characterization of the major leaf isoenzyme[J]. Journal of Experimental Botany, 1990, 41(231): 1223-1230.
- [17] 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.
- [18] 朱宝国, 张春峰, 于忠和, 等. 控释尿素和普通尿素配施对土壤氮含量及大豆产量和品质影响[J]. 中国农学通报, 2012, 28(18): 140-143.
- [19] 刘敏, 宋付朋, 卢艳艳. 硫膜和树脂膜控释尿素对土壤硝态氮含量及氮素平衡和氮素利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 541-548.
- [20] 李伟, 李絮花, 李海燕, 等. 控释尿素与普通尿素混施对夏玉米产量和氮肥效率的影响[J]. 作物学报, 2012, 38(4): 699-706.
- [21] 黄巧义, 唐控虎, 张发宝, 等. 控释尿素与常规尿素配施比例对甜玉米产量和氮肥利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(3): 622-631.
- [22] Zhao B, Dong S T, Wang K J, et al. Effects of controlled-release fertilizers on summer maize grain yield, field ammonia volatilization, and fertilizer nitrogen use efficiency [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(11): 2678-2684.
- [23] 闫童, 丁文峰, 曹永贞, 等. 控释氮肥对夏玉米氮素积累及产量的影响[J]. 中国农学通报, 2015, 31(36): 60-64.
- [24] 廖育林, 鲁艳红, 谢坚, 等. 紫云英配施控释氮肥对早稻产量及氮素吸收利用的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 190-195.
- [25] 王永军, 孙其专, 杨今胜, 等. 不同地力水平下控释尿素对玉米物质生产及光合特性的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(12): 2233-2240.
- [26] Kobayashi A, Fujisawa E, Hanyuu T. A mechanism of nutrient release from resin-coated fertilizers and its estimation by kinetic methods; 2. Release of nutrients affected by the permeability of water vapor through coating material [J]. Japanese Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 1997, 68: 14-22.
- [27] 林治安, 赵秉强, 袁亮, 等. 长期定位施肥对土壤养分与作物产量的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(8): 2809-2819.
- (上接第213页)
- [18] 张侃. 聚天门冬氨酸的合成与应用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
- [19] 张小燕, 马晖玲, 马政生. 聚天门冬氨酸对紫花苜蓿生物学性状及产量的影响[J]. 草业科学, 2010, 27(8): 114-118.
- [20] Deng F, Wang L, Ren W J, et al. Enhancing nitrogen utilization and soil nitrogen balance in paddy fields by optimizing nitrogen management and using polyaspartic acid urea [J]. Field Crops Research, 2014, 169: 30-38.
- [21] 王强. 稻田分次施氮对田面水和渗漏水中氮素变化特征的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [22] 王小治, 朱建国, 宝川靖和, 等. 施用尿素稻田表层水氮素的动态变化及模式表征[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(5): 852-856.
- [23] 张玉树, 丁洪, 秦胜金, 等. 农业生态系统中氮素反硝化作用与 N_2O 排放研究进展[J]. 中国农学通报, 2010, 26(6): 253-259.
- [24] Takeda I, Fukushima A, Tanaka R. Non-point pollutant reduction in a paddy-field watershed using a circular irrigation system [J]. Water Research, 1997, 31(11): 2685-2692.
- [25] 王强, 杨京平, 陈俊, 等. 非完全淹水条件下稻田表面水体中三氮的动态变化特征研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(7): 1182-1186.
- [26] 陈秉翼. 聚天门冬氨酸/盐(PASP)尿素与改性尿素对农作物增效机制研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2016.