内蒙古玉米施用缓释尿素的应用效果

段 玉[1,2] 侯建伟[1,2] 张 君[1,2] 景宇鹏[1,2]

（1. 内蒙古农牧业科学院资源环境与检测技术研究所，内蒙古 呼和浩特，010031；2. 农业部内蒙古耕地保育科学观测实验站，内蒙古 呼和浩特，0117053）

摘要：为了探究缓释尿素（CRU）在玉米上的吸收利用效果，在赤峰市和鄂尔多斯市分别进行了不同氮素处理对玉米产量、肥料吸收利用效果和土壤氮残留影响的大田小区试验。结果表明，施用氮肥玉米籽粒产量和秸秆产量可增加 13.3%–157.2% 和 6.9%–64.2%。减少 20% 施氮量的同时配比 75% 的缓释尿素，玉米籽粒、秸秆氮含量和积累量最大，与 100% 推荐施氮量无显著性差异。缓释尿素占比 60% 以上时氮素回收率、氮肥偏生产力和氮肥农学效率达最大值施用氮肥显著影响土壤中的硝态氮含量，硝态氮含量的变化是引起土壤矿质氮含量差异的主要因素。缓释尿素具有很好的增产和养分吸收利用效果，减少 20% 的施氮量缓释尿素占比 30% 以上与普通尿素配施即可替代 100% 推荐施氮量，且缓释尿素占比越大养分吸收利用效果越显著，但玉米产量间无显著性差异。

关键词：玉米；产量；缓释尿素；作用效果；氮素残留

玉米是内蒙古的第一大作物，年播种面积超过 300 万公顷，占内蒙古粮食作物播种面积的 50%，占全区粮食总产的 70% 以上[1]。玉米生长发育期间吸收氮素较多，每生产 100 公斤玉米籽粒吸收氮素（N）1.5–2.5 公斤，氮素是三大营养元素（NPK）中增产最大，最容易缺乏的元素[2]。但近年来随着我国氮肥施用量的快速增加，氮肥增产效果逐渐递减，氮肥当季利用率偏低、损失率偏高，环境风险增加等问题日益凸显[3]。在我国耕地资源有限、人口压力大的现实国情下，如何实现保证作物高产稳产的情况下减量化施肥，降低对环境的负面作用、提高氮肥利用率已成为我国农业可持续发展的必然要求。

普通氮肥，由于其速溶性特点，施用玉米田后短时间内迅速溶解，一次性基施通常导致玉米前期养分供应过量，中后期营养供应不足，养分利用率低[4]，只有通过少量分次施用才能达到为作物全生育期提供养分的目的，但此方法并不适应目前农村劳动力日益紧缺的现状。而缓释尿素通过各种调控机制有效控制养分释放速度和时间，延长作物对养分吸收利用的有效期[5]。因此，缓释尿素与普通尿素掺混一次基施，可以实现肥料间肥效的有效接力，达到缓急相济，优势互补，平衡供肥和高效利用的目的。衣文平等[6]于山东泰安的研究表明，在 0%、20%、25%、30% 和 40% 的缓释尿素比例中，30% 的缓释尿素比例最能提高玉米产量、氮肥利用率和氮素积累量；而孙克刚等[7]于河南驻马店小麦 / 玉米轮作的研究表明，在 0%、30%、50%、70% 和 100% 的缓释尿素比例中，70% 的缓释尿素比例的玉米产量和氮肥利用率最高；朱宝国等[8]于黑龙江的研究表明，在 0%、40%、60% 和 100% 的缓释尿素比例中，40% 的缓释尿素比例最能提高拔节期以后的玉米品质和叶绿素。

上述研究均表明，缓释尿素与普通尿素混施能提高玉米产量和氮素吸收利用，而对土壤质地和肥力差异悬殊的农田，通过缓释尿素与普通尿素合理配比一次性基施进行减量化施肥的研究相对较少。本研究以玉米为研究对象，在内蒙古东部（赤峰市）和西部（鄂尔多斯市）玉米种植区开展缓释尿素在玉米上的应用效果试验。研究其对玉米产量、氮肥利用效率及农学效率等的影响，以达到通过缓释尿素部分替代普通尿素保证玉米高产稳产的同时达到化学氮肥减量 20% 的目的，以期为缓释尿素的推广应用和制定玉米高产高效的氮肥配方施肥技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验分别在内蒙古赤峰市农牧业科学院（N118°06′，E42°10′48″）和鄂尔多斯市现代农牧业科技示范园区（N110°27′13.7″，E40°18′13.7″）进行。

赤峰市农牧业科学院试验地肥力中上等（表 1），土壤为栗钙土，质地为壤土。

鄂尔多斯市现代农牧业科技示范园区试验地肥力下等（表 1），土壤为潮土，质地为沙壤土。

表 1 试验土壤养分状况

项　目	试验地	
	赤峰市	鄂尔多斯市
OM/%	0.29	0.18
NH_4–N/(毫克/千克)	0	0
NO_3–N/(毫克/千克)	34.5	3.3
有效 P/(毫克/千克)	42.3	22.9
速效 K/(毫克/千克)	102.5	86.5
pH 值	8.45	8.62

1.2 试验作物

试验作物均为玉米，品种是当地的主推品种，具体情况见表 2。

表 2 试验基本情况

项　目	试验地	
	赤峰市	鄂尔多斯市
玉米品种	京单 128	丰田 6 号
种植密度/（株/亩）	4500	4500
播种日期	5 月 8 日	5 月 4 日
施肥量 N–P_2O_5–K_2O（公斤/公顷）	180–90–75	270–120–180
施肥方法	一次性基施	一次性基施
降雨量/毫米	309	240
灌水量/（立方米/公顷）	447	1500
灌溉方式	滴灌	喷灌
有效积温/oC（≥ 10℃）	2900	3100

1.3 田间管理和施肥

试验用缓释尿素（CRU）由美国加阳（中国）公司提供，含氮量（N）43%；普通尿素（RU）含氮量（N）46%，磷肥用三料磷肥（含 P_2O_5 46%），钾肥用氯化钾（含 K_2O 60%）。氮磷钾肥一次性基施，施肥后覆膜铺设滴灌管，打孔穴播，大小垄种植，窄行距 35 厘米，宽行距 65 厘米，株距 28 厘米。

1.4 实验设计

试验在磷钾基础上施用氮肥（普通尿素（RU）和缓释尿素（CRU）），共设 7 个处理，分别为：

（1）CK，不施氮

（2）推荐施氮量，施普通尿素（RU），即为：100%N(RU)；

（3）–N20% 推荐施氮量，施普通尿素（RU），即为：80% N（RU）；

（4）–N20% 推荐施氮量，CRU：RU=3：1，即为：80%N（75%CRU：25%RU）；

（5）–N20% 推荐施氮量，CRU：RU=3：2，即为：80%N（60%CRU：40%RU）；

（6）–N20% 推荐施氮量，CRU：RU=9：11，即为：80%N（45%CRU：55%RU）；

（7）–N20% 推荐施氮量，CRU：RU=3：7，即为：80%N（30%CRU：70%RU）；

小区面积 50 平方米，四次重复，随机排列。

1.5 测试项目与方法

作物产量调查：玉米成熟后，每小区选取代表性的 5 株进行玉米产量测定，并通过秸秆与籽实比例，计算玉米秸秆产量；

N 生理效率（千克/千克）=（施肥区产量 – 不施肥区产量）/（施肥区植物吸收的养分量 – 不施肥区植物吸收的养分量）；

N 回收率（%）=（施肥区植物吸收的养分量 – 不施肥区植物吸收的养分量）×100 / 施肥量 式中：施肥量 = 指养分量；

N 农学效率（千克/千克）=（施肥区产量 – 不施肥区产量）/ 施肥量；

N 偏生产力（千克/千克）= 施氮处理产量 / 施氮量；

植株及籽粒全 N 含量—浓 H_2SO_4–H_2O_2 消煮，凯氏法定氮法；

3 赤峰市和鄂尔多斯市玉米养分施用量（公斤 N/ 公顷）

处　理	赤峰市		鄂尔多斯市	
	CRU(N)	RU(N)	CRU(N)	RU(N)
CK（不施氮）	0	0	0	0
100%N（RU）	0	180	0	270
80% N（RU）	0	144	0	216
80%N（75%CRU:25%RU）	108	36	162	54
80%N（60%CRU:40%RU）	86.4	57.6	129.6	86.4
80%N（45%CRU:55%RU）	64.8	79.2	97.2	118.8
80%N（30%CRU:70%RU）	43.2	100.8	64.8	151.2

收获后各小区分别取耕层土壤（0–20 厘米）样品监测铵态氮和硝态氮

硝态氮—紫外分光光度法；

铵态氮—靛酚蓝比色法。

1.6 数据处理

利用 SAS9.0 进行方差分析（ANOVA），用 EXCEL2007 绘制表格。

2 结果与分析

2.1 不同氮肥处理对玉米产量的影响

2.1.1 籽实产量

赤峰市和鄂尔多斯市均表现为施用氮肥均显著增加了玉米的籽粒产量（$p<0.05$），分别较不施氮肥（CK）处理增产 40.0–113.3 公斤 / 亩和 280.0–406.7 公斤 / 亩，增产幅度为 5.0%–14.7% 和 123.9%–181.4%，农学效率分别为 4.2–12.1 和 18.3–28.4（表 4）。

由表 4 可知，减少 20% 的施氮量（80%N），氮肥施用普通尿素增产效果不及 100% 推荐施氮量（100%N（RU）），产量差异显著（$p<0.05$）。但缓释尿素与普通尿素不同比例混合，可以在高产稳产的情况下减少 20% 的施氮量（80%N）。在赤峰市配比缓释尿素，减少 20% 的施氮量玉米产量显著高于 100% 推荐施氮量（100%N（RU））；在鄂尔多斯市减少 20% 的施氮量玉米产量也至少可以保证与 100% 推荐施氮量（100%N（RU））无显著差异，且不减产。说明在赤峰市和鄂尔多斯市两个地区种植玉米通过缓释尿素的施用 –20%N 是可行的，但缓释尿素比例至少在 30% 以上，其占比例越大产量增幅越大，但其产量差异不显著。

2.1.2 秸秆产量

无论施用缓释尿素还是普通尿素，赤峰市和鄂尔多斯市的玉米秸秆产量均有所增加，分别增加了 0.5–1.6 吨 / 公顷和 2.7–3.6 吨 / 公顷（增幅分别为 3.4%–10.3% 和 55.3%–72.6%），（表 5），每公斤氮素可使玉米秸秆产量分别增加 3.7–9.0 公斤和 12.3–16.4 公斤。

多重均值检验结果表明，除各施氮处理与不施氮（CK）处理达显著差异水平外（$p<0.05$），其它各处理间均未达显著差异水平。说明施氮的确可以增加玉米秸秆产量，但缓释尿素、普通尿素、减少 20% 施氮量后缓释尿素与普通尿素混合并不会使玉米秸秆产量产生显著差异；一定施氮量范围内，氮肥用量不会成为玉米秸秆产量的限制因素。

表 4 不同施肥处理对玉米籽粒产量的影响

处理	赤峰市				鄂尔多斯市			
	籽实产量（公斤 / 亩）	增产（公斤 / 亩）	较 CK 增幅（%）	农学效率（公斤 / 公斤）	籽实产量（公斤 / 亩）	增产（公斤 / 亩）	较 CK 增幅（%）	农学效率（公斤 / 公斤）
CK（不施氮）	793.3±80.0e	––	––	––	793.3±80.0e	––	––	––
100%N（RU）	853.3±26.7c	66.7	8.2	5.4	853.3±26.7c	66.7	8.2	5.4
80% N（RU）	820.0±33.3d	40.0	5	4.2	820.0±33.3d	40.0	5	4.2
80%N（75%CRU:25%RU）	906.7±33.3a	113.3	14.7	12.1	906.7±33.3a	113.3	14.7	12.1
80%N（60%CRU:40%RU）	900.0±6.7a	113.3	14.2	11.7	900.0±6.7a	113.3	14.2	11.7
80%N（45%CRU:55%RU）	886.7±20.0	100.0	12.6	10.4	886.7±20.0	100.0	12.6	10.4
80%N（30%CRU:70%RU）	873.3±20.0ab	80.0	10.3	8.5	873.3±20.0ab	80.0	10.3	8.5

注：不同字母表示达到差异显著水平（P <0.05），以下相同。

表 5 不同施肥处理对玉米秸秆产量的影响

处理	赤峰市			鄂尔多斯市		
	秸秆产量（公斤 / 亩）	增产（公斤 / 亩）	较 CK 增幅（%）	秸秆产量（公斤 / 亩）	增产（公斤 / 亩）	较 CK 增幅（%）
CK（不施氮）	1053.3±33.3b	––	––	326.7±73.3b	––	––
100%N（RU）	1160.0±20.0a	106.7	10.3	553.3±40.0a	220.0	67.4
80% N（RU）	1086.0±53.3ab	33.3	3.4	566.7±60.0a	233.3	71.7
80%N（75%CRU:25%RU）	1126.7±60.0ab	73.3	7.3	566.7±20.0a	240.0	72.6
80%N（60%CRU:40%RU）	1140.0±60.0ab	93.3	8.6	513.3±6.7a	180.0	55.3
80%N（45%CRU:55%RU）	1126.7±73.3ab	73.3	7	526.7±66.7a	193.3	59.5
80%N（30%CRU:70%RU）	1100.0±46.7ab	46.7	4.6	520.0±26.7a	193.3	58.8

2.2 不同氮肥处理对玉米氮吸收利用的影响

2.2.1 不同氮肥处理对植株氮养分吸收量的影响

不同氮肥处理玉米氮养分含量存在差异，氮养分积累量具有显著差异（表 6）。赤峰市和鄂尔多斯市两个试验地各氮肥处理的玉米籽粒氮素含量、秸秆氮素含量和植株氮素总吸收量均高于对照（CK），增幅分别为 0.8%–11.1%、7.7%–22.0%、11.4%–25.0% 和 19.4%–30.6%、22.2%–41.7%、153.4%–220.6%。各处理中，减少 20% 施氮量缓释尿素与普通尿素 3:1 配比时，玉米籽粒氮含量、秸秆氮含量及氮积累量达最大值，分别为 1.40%、1.11%、373.2 公斤 / 公顷和 0.47%、1.02%、136.9 公斤 / 公顷。

赤峰市和鄂尔多斯市两个试验地的各个氮肥处理的玉米籽粒氮含量、秸秆氮含量和植株氮素总吸收量差异较大，赤峰市分别是鄂尔多斯市的 2.9–3.5 倍、1.1–1.3 倍和 2.7–7.0 倍。同一地区的玉米籽粒氮含量没有显著差异，秸秆氮含量和植株氮素总吸收量只与对照差异显著（$p<0.05$），减少 20% 施氮量的各处理与不减氮处理（100%N（RU））间没有显著差异，说明在赤峰市和鄂尔多斯市玉米施肥过程中 –20%N 是可行的，且 –20%N 的同时配比 75% 的缓释尿素，玉米籽粒、秸秆氮素含量及累积量相对较大。

2.2.2 不同氮肥处理对氮养分吸收利用率的影响

缓释尿素显著提高了氮素回收率，缓释尿素占比 75% 时氮素回收效果最佳，氮肥利用率最高，分别为 41.5%（赤峰市）和 52.3%（鄂尔多斯市）。缓释尿素为 30%–60% 时，各处理间的氮肥利用率无显著性差异，但均高于普通尿素处理（100%N（RU）和 80%N（RU）），最大可提高 22.6 百分点（表 7）。说明缓释尿素具有很好的缓释效果，可以延长氮肥肥效，促进玉米吸收氮素养分。

赤峰市和鄂尔多斯市两项试验均表明，缓释尿素不能显著提高氮肥生理利用效率，其变异范围分别为 23.3–29.8 千克 / 千克和 30.7–44.0 千克 / 千克。缓释尿素较普通尿素对氮肥偏生产力和农学效率具有显著的提高作用。减少 20% 氮施入量，缓释尿素较普通尿素的氮肥偏生产力可分别提高 28.1%–32.8%（赤峰市）和 12.0%–16.3%（鄂尔多斯市），分别在缓释尿素为 75% 和 60% 时达最大值；缓释尿素较普通尿素的氮肥农学效率可分别提高 57.4%–124.1%（赤峰市）和 29.5%–55.2%（鄂尔多斯市），分别在缓释尿素为 75% 和 60% 时达最大值。说明减少 20% 的氮施入量，通过普通尿素配比 60% 以上的缓释尿素可以达到比 100% 推荐施氮量更好的氮素吸收利用效果。

表 6 不同氮肥处理玉米籽粒和秸秆的氮素养分含量及积累量

处　理	赤峰市			鄂尔多斯市		
	籽粒	秸秆	植株总吸收量	籽粒	秸秆	植株总吸收量
	（%）		（公斤 / 公顷）	（%）		（公斤 / 公顷）
CK（不施氮）	1.26± 0.12a	0.91± 0.09b	298.6±8.6c	0.36±0.06a	0.72±0.03b	42.7±12.4b
100%N（RU）	1.31± 0.05a	0.98± 0.05ab	332.7±10.3b	0.45±0.04a	0.88±0.14ab	108.2±20.8a
80% N（RU）	1.27± 0.06a	1.05± 0.06ab	333.3±8.9b	0.43±0.12a	0.94±0.09b	108.1±39.3a
80%N（75%CRU:25%RU）	1.40± 0.09a	1.11± 0.12a	373.2±40.2a	0.47±0.12a	1.02±0.22a	136.9±35.1a
80%N（60%CRU:40%RU）	1.36± 0.05a	1.03± 0.10ab	365.7±13.8ab	0.47±0.08a	0.93±0.07ab	122.0±7.3a
80%N（45%CRU:55%RU）	1.32± 0.05a	1.02± 0.05ab	348.7±2.7ab	0.44±0.06a	0.95±0.06ab	119.5±9.4a
80%N（30%CRU:70%RU）	1.29± 0.04a	1.09± 0.10a	348.3±14.6ab	0.45±0.06a	0.92±0.11ab	114.2±2.1a

表 7 不同氮肥处理对玉米氮素养分吸收利用效率的影响

地　点	指　标	处　理						
		CK（不施氮）	100%N（RU）	80%N（RU）	80（75%CRU:25%RU）	80（60%CRU:40%RU）	80（45%CRU:55%RU）	80（30%CRU:70%RU）
赤峰市	氮素回收率 /%	– –	18.9c	19.3bc	41.5a	37.3ab	27.8abc	27.6abc
	生理利用率 / 千克 / 千克	– –	28.3a	27.2a	23.3a	25.1a	29.8a	24.7a
	氮肥偏生产力 / 千克 / 千克	– –	71.1C	88.9B	94.4A	93.8 A	92.4B	91.1B
	氮肥农学效率 / 千克 / 千克	– –	5.4f	6.6e	12.1a	11.7b	10.4c	8.5d
鄂尔多斯市	氮素回收率 /%	– –	36.4c	36.3c	52.3a	44b	42.6b	39.7b
	生理利用率 / 千克 / 千克	– –	30.7a	35.2a	44.0a	43.1a	41.7a	39.4a
	氮肥偏生产力 / 千克 / 千克	– –	65.5b	64.0b	65.1b	74.7a	72.6a	71.7a
	氮肥农学效率 / 千克 / 千克	– –	18.3c	19.4c	28.4a	27.4a	25.8b	23.7b

2.3 不同氮肥处理对土壤氮素残留的影响

赤峰市各氮素处理收获后耕层土壤硝态氮含量显著高于铵态氮，约为铵态氮含量的 3.5–7.0 倍，100%N（RU）处理最大（7.0 倍），80%N（RU）处理最小（3.5 倍）。各处理间的硝态氮含量除减少 20% 施氮量缓释尿素与普通尿素混合的各处理间无显著性差异外，其它各处理间均具有达显著差异水平（$p<0.05$），但各处理间的铵态氮含量均无显著性差异。说明处理间矿质氮含量的差异主要是由硝态氮的含量差异引起的。

施氮肥处理土壤的硝态氮含量均高于 CK（不施氮肥），高出 6.1%–51.0%。减少 20% 施氮量时，施用缓释尿素土壤的硝态氮含量比单施普通尿素（80%N（RU））高出 8.8%–14.2%，80%N(75%CRU 25%RU) 处理土壤的硝态氮含量最大，为 20.97 毫克 / 千克，较 100% 推荐施氮量低了 5.19 毫克 / 千克，达显著差异水平（$p<0.05$）。

鄂尔多斯市收获后耕层土壤硝态氮含量和铵态氮含量基本相当，除各氮素处理与对照（CK）达显著差异水平外（$p<0.05$），其它各处理间均未达显著差异水平。施氮肥处理土壤的硝态氮和铵态氮含量均高于 CK（不施氮），分别高出 15.7%–46.5% 和 26.3%–43.0%，80%N（75%CRU : 25%RU）处理其含量最高，分别为 2.71 毫克 / 千克和 2.95 毫克 / 千克。减少 20% 施氮量施用缓释尿素土壤的硝态氮含量比单施普通尿素（80%N（RU））高出 13.5%–26.0%，80%N（75%CRU : 25%RU）处理土壤的硝态氮含量最大，为 2.71 毫克 / 千克，较 100% 推荐施氮量高出 26.6%，但未达显著差异水平。

3 讨论

高产、高效、简化施肥是未来科学施肥的目标和方向，因地制宜开发与应用作物专用缓 / 控释肥料是实现科学施肥目标的重要途径和措施，也是适应当前农村大量劳动力转移出农业生产领域的现实需要 [9]。本研究中氮肥一次性基施，通过缓释尿素与普通尿素合理配比，实现减少 20% 施氮量和肥料高产、高效的目的，从而简化施肥，减少施肥量，降低种植成本。氮是三大营养元素中对玉米产量贡献最大的营养元素，施用氮肥使赤峰市和鄂尔多斯市的玉米分别增产 0.6–1.7 吨 / 公顷和 4.2–6.1 吨 / 公顷，平均增幅为 13.3% 和 157.2%。鄂尔多斯市施用氮肥玉米产量效应最大，这可能与两个试验地的土壤质地和基础地力有关（赤峰市的试验地土壤为栗钙土，肥力中上等（表 1）；而鄂尔多斯市试验园区土壤为潮土，肥力下等（表 1））。近些年来，不同学者在不同质地土壤、基础肥力和作物上进行了大量的缓释肥料效果研究。如汪强等在砂壤质土壤上，进行了冬小麦缓释氮肥一次底施与等量速效氮肥分次施用的效果研究 [10]；李宗新等在玉米上，研究了缓控释氮肥一次施用的效果 [11]；卢艳丽等在粉砂质潮土上，比较了冬小麦 – 夏玉米轮作不同缓 / 控释氮肥一次施用与普通尿素分次施用的效果。结果均表明，采用缓 / 控释氮肥在作物产量或氮肥利用率方面可取得与速效氮肥分次施用接近或显著增加的效果 [12]。与本文研究结果一致，本文试验结果表明施用缓释尿素较普通尿素的氮素回收率、氮肥偏生产力和氮肥农学效率平均提高 8.4–14.3、

表 8 玉米收获后耕层（0-20cm）土壤矿质氮含量（毫克 / 千克）

处　理	赤峰市		鄂尔多斯市	
	硝态氮	铵态氮	硝态氮	铵态氮
CK（不施氮）	17.32±1.69d	3.09±0.40a	1.85±0.75b	2.28±0.15b
100%N（RU）	26.16±6.54a	3.72±0.90a	2.14±0.39a	2.99±0.60a
80% N（RU）	18.37±0.26c	5.25±2.64a	2.15±0.58a	3.26±0.47a
80%N（75%CRU:25%RU）	20.97±6.02b	3.1±0.28a	2.71±0.06a	2.95±0.05a
80%N（60%CRU:40%RU）	20.39±7.00b	3.11±0.20a	2.46±0.34a	2.88±0.51a
80%N（45%CRU:55%RU）	19.98±6.79b	3.36±0.34a	2.61±0.09a	3.00±0.79a
80%N（30%CRU:70%RU）	20.59±2.55b	3.62±0.75a	2.44±0.49a	3.15±0.23a

4.5–11.0 和 35.7–61.7 百分点。与郭萍等[13]研究结果均认为普通尿素配比 75% 的缓释尿素时玉米的籽粒产量、秸秆产量和氮素吸收利用效果最好。缓释尿素占比 75% 时，缓释尿素较普通尿素的玉米籽粒产量、氮素回收率、氮肥偏生产力和氮肥农学效率，赤峰市平均提高 13.3%、14.3%、4.5% 和 61.7%；鄂尔多斯市平均提高 157.2%、8.4%、11.0% 和 35.7%。玉米的增产效果高于一些研究结果[13,14]，这可能与试验地点、土壤质地和基础肥力等差异有关。

硝态氮进入植物体内转换为铵态氮才能参与氨基酸和蛋白质的合成，而 GS–GOGA 吨 循环是作物体内铵态氮同化的主要途径，是整个氮代谢的中心[15–18]。因此玉米氮代谢的关键酶 GS、GOGAT 活性很大程度的影响氮素的吸收利用和氮素残留，进而影响玉米产量。郭萍等[13]研究表明，50% 和 75% 的缓释尿素比例前期叶片氮代谢酶活性高，保证了氮素吸收和物质生产，后期氮代谢酶活性较高促进了氮素的利用，从而获得高产。至于本文中缓释尿素与普通尿素掺混是否通过影响氮代谢关键酶活性提高了玉米产量和氮素的吸收利用效果还需进一步研究。

玉米收获后的土壤无机氮残留表明（赤峰市试验），掺混缓释尿素处理较普通尿素显著提高了土壤的硝态氮含量（提高了 10.9%–14.2%），而铵态氮含量无显著差异。说明缓释尿素能够减缓硝态氮向铵态氮的转化速率，延长了作物对养分吸收利用的有效期。

4 结论

（1）施用氮肥显著增加了玉米籽实和秸秆产量，且鄂尔多斯市玉米增产效果更为显著。赤峰市和鄂尔多斯市玉米籽实产量平均增产 13.3% 和 157.2%，秸秆产量平均增产 6.9% 和 64.2%。缓释尿素比例越大增产效果越显著，缓释尿素比例在 30% 以上时，可减少 20% 的施氮量，同时保证与 100% 推荐施氮量无显著性的产量差异。

（2）赤峰市和鄂尔多斯市玉米施肥过程中减少 20% 的施氮量同时配比 75% 的缓释尿素，玉米籽粒氮含量、秸秆氮含量和积累量最大且与 100% 推荐施氮量无显著性差异。不同氮肥处理和试验区玉米籽粒氮含量、秸秆氮含量和积累量差异显著，赤峰市平均是鄂尔多斯市的 1.3 倍、2.3 倍和 3.5 倍。

（3）缓释尿素显著提高了玉米氮素养分吸收利用效率，占比例 60% 以上时效果最佳，缓释尿素较普通尿素的氮素回收率、氮肥偏生产力和氮肥农学效率，赤峰市平均提高 14.3、4.5 和 61.7 百分点；鄂尔多斯市平均提高 8.4、11.0 和 35.7 百分点。

（4）施用氮肥显著影响土壤中的硝态氮含量，硝态氮含量的变化是引起土壤矿质氮含量差异的主要因素。

参考文献

[1] 黄伟，武向良．内蒙古玉米产业发展思路和布局研究 [J]. 现代农业，2010, 2(1):42–43.

[2] 赵洪祥，边少锋，孙宁，等．氮肥运筹对玉米氮素动态变化和氮肥利用的影响 [J]. 玉米科学，2012, 20(3):122–129.

[3] 朱兆良．中国土壤氮素研究 [J]. 土壤学报，2008, 45(5):778–783.

[4] 司东霞，崔振岭，陈新平，等．不同控释氮肥对夏玉米同化物积累及氮平衡的影响 [J]. 应用生态学报，2014, 25(6):1745–1751.

[5] 冯爱青，张民，李成亮，等．控释氮肥对土壤酶活性与土壤养分利用的影响 [J]. 水土保持学报，2014, 28(3):177–184.

[6] 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.

[7] 孙克刚，李丙奇，李潮海，等．树脂包膜尿素与普通尿素配施及树脂包膜 BB 肥在玉米上增产效果研究 [J]. 河南化工，2010, 27 (23):26–29.

[8] 朱宝国，于忠和，贾会彬，等．控释尿素和普通尿素混施对玉米生理特性和品质的影响 [J]. 黑龙江农业科学，2011, (7):42–44.

[9] 王宜伦，李朝海，王瑾，等．缓 / 控释肥在玉米生产中的应用与展望．中国农学通报，2009, 25(24):254–257.

[10] 汪强，李双凌，韩燕来，等．缓释肥对冬小麦增产与提高氮肥利用率的研究．磷肥与复肥，2006, 21(6):74–75.

[11] 李宗新，王庆成，刘霞，等．控释肥对夏玉米的应用效应研究．玉米科学，2007, 15(6):89–92, 96.

[12] 卢艳丽，白由路，王磊，等．华北小麦 – 玉米轮作区缓控释肥应用效果分析．植物营养与肥料学报，2011, 17(1):209–215.

[13] 郭萍，朱从桦，查丽，等．缓释尿素与普通尿素不同配比对玉米氮代谢酶和氮素利用的影响 [J]. 中国土壤与肥料，2016, 10 (6):99–105.

[14] 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.

[15] 孙永健，孙园园，李旭毅，等．水氮互作下水稻氮代谢关键酶活性与氮素利用的关系 [J]. 作物学报，2009,35(11):2055–2063.