

姬景红, 李玉影, 刘双全, 等. 控释尿素对春玉米产量、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 Jing-hong, Li Yu-ying, Liu Shuang-quan, 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.

## 控释尿素对春玉米产量、氮效率及氮素平衡的影响

姬景红<sup>1</sup>, 李玉影<sup>1</sup>, 刘双全<sup>1</sup>, 佟玉欣<sup>1</sup>, 任桂林<sup>2</sup>, 李杰<sup>1</sup>, 刘颖<sup>1</sup>, 张明怡<sup>1</sup>

(1.黑龙江省土壤环境与植物营养重点实验室, 黑龙江省肥料工程技术研究中心, 黑龙江省农业科学院土壤肥料与环境资源研究所, 黑龙江 哈尔滨 150086; 2.黑龙江省气象局, 黑龙江 哈尔滨 150010)

**摘要:**为明确控释尿素在春玉米上的应用效果及土壤氮素平衡状况,在黑龙江省双城、宾县、哈尔滨、肇源地区通过2011—2012年两年四点次田间小区试验,研究普通尿素与控释尿素(控释期90 d的树脂包膜尿素)混合施用对春玉米产量、氮肥效率(NUE)及土壤氮素盈亏的影响。结果表明,春玉米产量、植株吸氮量均随着施氮量的增加而增加。与普通尿素一次性基施相比,控释尿素能够提高玉米产量、植株吸氮量、氮肥表观利用率、氮农学效率(ANUE)及氮肥贡献率(FCR)。在相同氮素施水平下(100%、75%、50%氮肥用量),100%基施控释尿素比100%基施普通尿素各处理玉米产量分别平均增加391、427、291 kg·hm<sup>-2</sup>;氮肥表观利用率提高5.9%、4.9%和5.1%;氮肥农学效率提高2.0、2.6 kg·kg<sup>-1</sup>和2.6 kg·kg<sup>-1</sup>;氮肥贡献率增加2.7%、3.1%和2.4%。处理4(普通尿素40%基肥,60%追施)和处理5(40%普通尿素与60%控释尿素混合一次性基施)玉米产量、植株吸氮量、氮肥表观利用率、氮农学效率差异不显著。氮素表观亏缺量随着氮肥用量的增加而降低。与100%普通尿素作基肥一次性施入相比,100%控释尿素一次性基施降低氮素表观损失量15.0 kg·hm<sup>-2</sup>;40%普通尿素与60%控释尿素混合一次性基施降低氮素表观损失率23.9 kg·hm<sup>-2</sup>。可见,普通尿素与控释尿素分别以40%和60%的比例混合施用在黑龙江省玉米生产上是可以推广和借鉴的氮素管理方式。

**关键词:**控释尿素;春玉米;产量;氮效率;氮平衡

中图分类号:S145.6

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2017)02-0153-08

doi:10.13254/j.jare.2016.0231

### Effects of Controlled-Release Urea on Grain Yield of Spring Maize, Nitrogen Use Efficiency and Nitrogen Balance

Ji Jing-hong<sup>1</sup>, Li Yu-ying<sup>1</sup>, Liu Shuang-quan<sup>1</sup>, Tong Yu-xin<sup>1</sup>, Ren Gui-lin<sup>2</sup>, Li Jie<sup>1</sup>, Liu Ying<sup>1</sup>, Zhang Ming-yi<sup>1</sup>

(1.The Key Lab of Soil Environment and Plant Nutrition, Research Center of Fertilizer Engineering and Technology of Heilongjiang Province, Institute of Soil Fertilizer and Environment Resources, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China; 2.Heilongjiang Meteorological Bureau, Harbin 150010, China)

**Abstract:** The effects of mixing controlled-released urea (CRU) (release period of resin coated urea is 90 days) and urea (U) on maize yield, nitrogen use efficiency and nitrogen balance were studied by 4 plot experiments (site: Shuangcheng, Binxian, Harbin and Zhaoyuan) in two years (from year 2011 to 2012) to clarify the effect of controlled release urea on spring maize and soil nitrogen balance. Results were as follows: Spring maize yield and nitrogen absorption were increased with the increasing nitrogen fertilizer. Compared with applying urea treatment, applying CRU could increase yield, nitrogen absorption, nitrogen use efficiency, agriculture efficiency of nitrogen and nitrogen contribution rate. Under the same amount of nitrogen (100%, 75%, 50%), compared with 100% U as basic fertilizer treatment, maize yield of 100% CRU treatment increased 391, 427, 291 kg·hm<sup>-2</sup>, nitrogen use efficiency increased by 5.9%, 4.9% and 5.1%, agriculture efficiency of nitrogen increased 2.0, 2.6, 2.6 kg·kg<sup>-1</sup>, and nitrogen contribution rate increased 2.7%, 3.1% and 2.4%, respectively. The value of maize yield, nitrogen absorption, nitrogen use efficiency and agriculture efficiency of nitrogen between the treatment four (40% urea as basic fertilizer+60% urea as

收稿日期:2016-09-27

基金项目:博士后科研启动资助金(LBH-Q15132);国家科技支撑计划项目(2015BAD23B05-06);IPNI 资助项目(NMBF-Heilongjiang-2015);黑龙江省农业科技创新工程(2014ZD021);国际合作项目(2014DFA31820)

作者简介:姬景红(1979—),女,黑龙江哈尔滨人,博士,副研究员,研究方向为土壤肥力与植物营养。E-mail: jinghong\_98@163.com

topdressing) and treatment five(40% urea plus 60% controlled release urea as basic fertilizer) were similar. Apparent profit and loss of nitrogen decreased with the increase of nitrogen nitrogen fertilizer. Nitrogen apparent loss by applying 100% controlled release urea was reduced of 15.0 kg·hm<sup>-2</sup> than applying 100% U treatment; Nitrogen apparent loss amount was decreased of 23.9 kg·hm<sup>-2</sup> under treatment five. The method of mixing 40% urea and 60% controlled release urea should be applied in maize production in Heilongjiang Province.

**Keywords:** controlled-released urea; spring maize; yield; nitrogen use efficiency; nitrogen balance

氮是玉米生长发育所必需的营养元素。近年来,随着化肥投入量的增加,肥料增产能力和利用率下降的现象相当普遍<sup>[1-2]</sup>。合理施用氮肥对于提高玉米产量、氮肥利用率、减轻环境压力具有重要意义<sup>[3]</sup>。而氮肥的合理施用除了要确定适宜的氮肥用量外,还应注重肥料的施用时期和形态<sup>[4]</sup>。包膜肥料的研究和应用为解决上述问题提供了新的途径<sup>[5]</sup>。与普通尿素相比,控释氮肥具有养分释放缓慢、作物吸收多的特点,使用控释肥可以显著提高氮肥利用率<sup>[6]</sup>,减少氮素损失<sup>[7-8]</sup>,免去追肥环节,在生产上具有较高的应用价值。目前,很多研究者研究了缓控释尿素施用对作物产量、肥料利用率的影响。曹宁等<sup>[9]</sup>的研究表明,以硅藻土为载体的控释尿素替代普通尿素,一次性基施的施肥方式替代基肥加追肥是可行的,能达到省工、增效的目的,尿素分次施用和控释尿素处理分别比尿素一次性施用处理玉米产量增加 23.48%和 17.70%,氮肥利用效率提高 17.33%和 17.58%。李伟等<sup>[10]</sup>的研究结果表明,控释掺混肥对夏玉米增产效果显著,能显著提高夏玉米氮素积累量,较常规施肥处理的氮素积累量提高 7.88%~20.29%,氮素利用效率增加 9.59%~24.69%。目前,关于黑龙江省春玉米施用控释尿素效果的报道较少<sup>[11-12]</sup>。以往研究多集中在控释肥施用对夏玉米的产量及肥料利用率的影响上,而对于气候、土壤条件完全不同的春玉米控释尿素施用效果,尤其是对土壤氮素损失、平衡方面尚缺乏进一步深入研究。目前,黑龙江省玉

米氮肥施用主要采用一次基肥一次追肥的施肥方式(40%氮肥做基肥,60%氮肥做追肥),由于玉米生育后期植株较高,机械追肥困难,采用缓控释肥与普通尿素混合一次性施肥能否达到相似的产量效果,亟需试验研究和验证。因此,本文旨在明确控释尿素在黑龙江省玉米主产区应用效果及对土壤氮素平衡的影响,为该区控释尿素的合理施用以及玉米简化高效施肥提供理论依据和技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点

2011 年试验设在黑龙江省肇源县二站镇东海丰村和双城市双城镇中兴村;2012 年试验设在黑龙江省宾县宾州和哈尔滨市民主乡。各试验点玉米生长季降雨量如图 1 所示。2011 年 5—10 月双城、肇源的降雨量分别为 450.0 mm 和 304.9 mm;2012 年 5—10 月哈尔滨、宾县的降雨量分别为 635.3 mm 和 585.7 mm。

### 1.2 试验设计

试验设 9 个处理(见表 1),每个处理 3 次重复,随机区组排列,小区面积 40 m<sup>2</sup>。

### 1.3 供试材料

供试土壤:肇源试验点为碳酸盐黑钙土,宾县和哈尔滨试验点为黑土,供试土壤基本化学性质见表 2。

供试肥料:氮肥为市售普通尿素(含 N 46%),磷肥为重过磷酸钙(含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 46%),钾肥为氯化钾(含 K<sub>2</sub>O

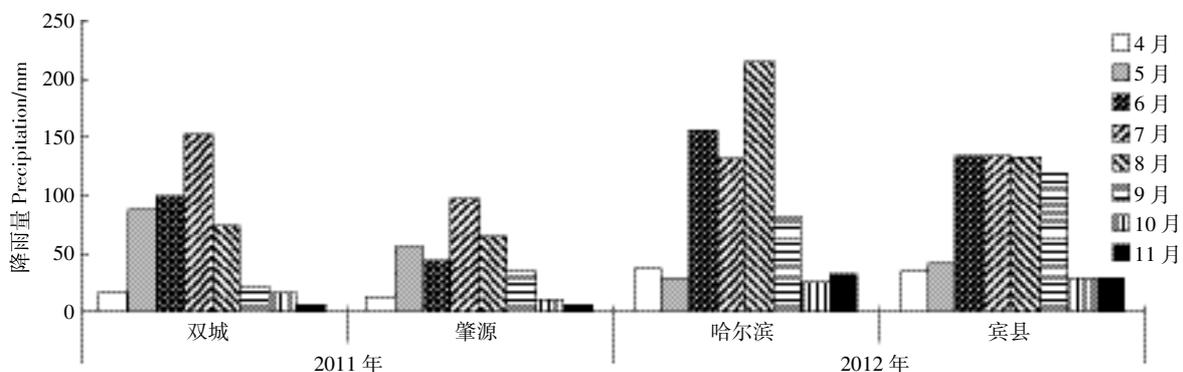


图 1 不同试验点玉米生长季降雨量

Figure 1 Month rainfall depth during the growing season of maize in different experimental sites

表 1 试验处理及养分用量(kg·hm<sup>-2</sup>)

Table 1 The experimental treatments and the rates of fertilizer(kg·hm<sup>-2</sup>)

处理 Treatments	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
处理 1 不施 N 肥	0	60	75
处理 2 推荐用量(普通尿素),一次性基施	175	60	75
处理 3 推荐用量(控释尿素),一次性基施	175	60	75
处理 4 40%普通尿素播前基施,60%拔节期追肥	175	60	75
处理 5 40%普通尿素+60%控释尿素混合一次性基施	175	60	75
处理 6 推荐用量的 75%(控释尿素),一次性基施	133	60	75
处理 7 推荐用量的 75%(普通尿素),一次性基施	133	60	75
处理 8 推荐用量的 50%(控释尿素),一次性基施	87	60	75
处理 9 推荐用量的 50%(普通尿素),一次性基施	87	60	75

表 2 0~20 cm 土层供试土壤基本理化性质

Table 2 Basic physicochemical properties of soil in 0~20 cm layer

年份 Year	地点 Locations	pH 值	有机质 OM/ g·kg <sup>-1</sup>	碱解 N available N/ mg·kg <sup>-1</sup>	硝态氮 NO <sub>3</sub> -N/ mg·kg <sup>-1</sup>	铵态氮 NH <sub>4</sub> -N/ mg·kg <sup>-1</sup>	有效 P available P/ mg·kg <sup>-1</sup>	速效 K available K/ mg·kg <sup>-1</sup>
2011 年	双城中兴村	6.63	38.2	187.9	21.2	7.5	29.4	173.2
	肇源东海丰村	8.07	29.4	151.2	17.9	6.8	19.3	162.8
2012 年	宾县宾州	6.11	35.7	138.4	16.5	6.1	50.2	152.1
	哈尔滨民主乡	6.54	33.1	122.6	15.7	5.2	48.2	183.0

60%)。控释尿素(CRU)由中国农科院提供的美国A-griuln 公司生产的树脂包膜尿素(含 N 44%),控释期为 90 d。根据欧洲标准委员会规定:缓控释肥料(TC260/WG4/TFsrF)在水中(25℃)养分释放速率 24 h 不大于 15%、28 d 不超过 75%、在规定的时间内至少有 75%被释放(Trenkel,1997)。本试验所用控释尿素符合标准,25℃和 35℃时,24 h 养分释放率分别为 1.8%和 2.9%;在 28 d 时的溶出速率分别为 57.6%和 67.7%(图 2)。

供试玉米品种:双城和肇源供试玉米品种为郑单 958;宾县和哈尔滨供试玉米品种分别为玉 258 和龙

丹 42;玉米种植密度为 6.0 万株·hm<sup>-2</sup>。

### 1.4 样品采集与田间管理

#### 1.4.1 土壤样品采集

试验前和收获后按 S 点取样法采集土壤样品,取样部位为垄台坡的侧面。每小区用土钻取 3 钻,取后立即放入封口袋中,取样深度为 0~20、20~40、40~60、60~80 cm,共 4 层。

#### 1.4.2 植株样品采集

玉米成熟后,取小区中间 4 垄 60 穗测产;采集各小区代表性玉米 5 株测定植株含氮量。

#### 1.4.3 田间管理

正常田间管理。双城试验 2011 年 4 月 29 日播种,9 月 30 日收获;肇源试验 2011 年 5 月 5 日播种,10 月 3 日收获;宾县试验 2012 年 5 月 12 日播种,10 月 6 日收获;哈尔滨试验 2012 年 5 月 15 日播种,10 月 3 日收获。

#### 1.4.4 测定方法

常规方法<sup>[13]</sup>分析土壤 pH 值及养分含量;AAS 连续流动分析仪测定土壤硝态氮和铵态氮含量;植株和籽粒样品于 105℃杀青 30 min,70℃烘干,称重,凯氏定氮法测定样品中全氮含量。

### 1.5 数据分析及计算公式

试验数据用 Excel 2007 和 SPSS 13.0 统计分析。

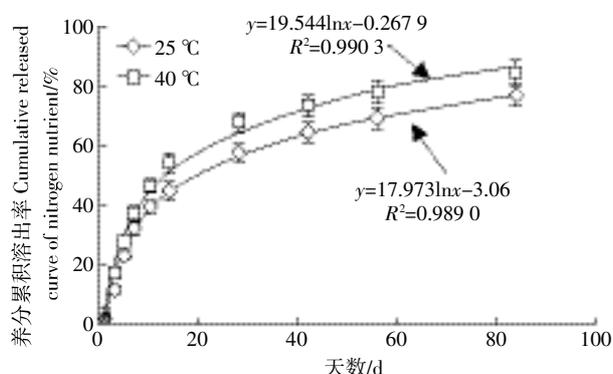


图 2 不同温度下控释尿素氮素释放曲线

Figure 2 Nitrogen released curve of controlled-release urea under different temperatures

产量(kg·hm<sup>-2</sup>)(14%含水量)=[60 穗玉米总粒重(kg)/60×密度(万株·hm<sup>-2</sup>)/10]×0.14/籽粒含水量(%)

氮肥利用率(NUE)(%)=(施氮区地上部分吸氮量-不施氮肥区地上部吸氮量)/施氮量×100;

氮肥农学效率(ANUE)(g·g<sup>-1</sup>)=(施氮区产量-不施氮区产量)/施氮量;

氮肥贡献率(FCR)(%)=(施氮区产量-不施氮区产量)/施氮区产量×100;

氮素矿化根据无氮区作物吸氮量与试验前、后土壤无机氮的净矿化计算<sup>[14]</sup>,由于不考虑氮肥的激发效应,故假定施氮肥处理的土壤氮素矿化量和无氮肥区相同,即:

生育期土壤氮素净矿化量(kg·hm<sup>-2</sup>)=不施氮肥区植株地上部吸氮量+不施氮肥区土壤无机氮残留量-不施氮肥区土壤起始无机氮含量;

根据氮素平衡模型原理,计算氮的表观盈亏量及表观损失量<sup>[15]</sup>:

由于施入氮肥所增加的土壤氮矿化量与被土壤固定的化肥氮的数量基本相当<sup>[16]</sup>,因此:

氮素表观盈亏量(kg·hm<sup>-2</sup>)=(土壤无机氮起始总量+施氮量)-(土壤无机氮残留量+作物吸氮量)

氮素表观损失(kg·hm<sup>-2</sup>)=氮输入量(施入氮肥+土壤起始无机氮+土壤氮矿化)-作物吸氮量-土壤无机氮残留量。

## 2 结果与分析

### 2.1 控释尿素对玉米产量的影响

2011 年和 2012 年两年四点试验结果表明(表 3),在相同磷肥和钾肥水平上,玉米产量均表现出随着施

氮量的增加而增加。与处理 1(不施氮)相比,各施氮处理显著增加玉米产量,其中,处理 4(普通尿素 40%基施,60%追施)、处理 5(40%普通尿素与 60%控释尿素混合一次基施)玉米产量分别平均增加 58.4%和 54.8%。在相同施氮水平下(100%、75%、50%氮肥用量),基施控释尿素比基施普通尿素(处理 3 与处理 2 相比,处理 6 与处理 7 相比,处理 8 与处理 9 相比)玉米平均增产 319、427、291 kg·hm<sup>-2</sup>,增产率分别为 3.6%、5.4%、3.9%。四个试验点均以处理 4 和处理 5 玉米产量显著高于等氮量的处理 2(普通尿素 100%基施和处理 3(控释尿素 100%基施)。其中双城、宾县、哈尔滨黑土区,以处理 4 玉米产量最高,但与处理 5 产量差异不显著。肇源黑钙土区,40%普通尿素与 60%控释尿素混合一次性基施效果最佳,产量达 9 360 kg·hm<sup>-2</sup>。

### 2.2 控释尿素对玉米氮肥利用率的影响

不同施肥处理的玉米植株吸氮量有明显的差异(表 4)。植株吸氮量变化趋势与玉米产量变化趋势一致,基本上是随着氮肥用量的增加而增加。以处理 4 和处理 5 两处理玉米植株吸氮量高于其他处理,且两处理之间差异不显著。不同氮肥类型相同氮肥用量条件下(100%、75%、50%氮肥用量),控释尿素处理玉米植株氮素吸收量高于普通尿素处理。其中 100%和 75%氮肥用量下,控释尿素氮素吸收较普通尿素分别增加 10.3 kg·hm<sup>-2</sup> 和 6.5 kg·hm<sup>-2</sup>(处理 3 与处理 2 相比,处理 6 与处理 7 相比),但各处理间差异不显著。

在氮肥 100%用量条件下,4 个试验点均表现为处理 4 和处理 5 氮肥利用率较高(表 5),其中双城试验点为 46.9%和 45.5%,肇源试验点为 41.3%和

表 3 不同施氮处理对玉米产量的影响(kg·hm<sup>-2</sup>)  
Table 3 Effect of different N managements on maize yield(kg·hm<sup>-2</sup>)

处理 Treatments	2011 年		2012 年	
	双城 Shuangcheng	肇源 Zhaoyuan	宾县 Binxian	哈尔滨 Harbin
处理 1	6 345±217e	5 321±421e	6 976±473e	6 345±544e
处理 2	9 064±312bc	8 254±467c	9 483±398bc	9 064±649bc
处理 3	9 439±253bc	8 515±503b	9 746±467bc	9 439±634bc
处理 4	10 745±432a	9 204±476ab	10 379±542a	10 745±465a
处理 5	10 430±654ab	9 360±538a	9 925±392ab	10 430±528ab
处理 6	8 495±439bcd	7 458±374cd	9 615±586bc	8 495±485bcd
处理 7	7 865±276cd	7 253±345cd	9 374±640c	7 865±432cd
处理 8	7 689±426d	6 987±578d	8 778±345d	7 689±489d
处理 9	7 394±346d	6 754±520d	8 437±456d	7 394±387d

注:同列数据中不同字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下同。

Note: Different letters in the same column mean 5% significant difference among different treatments. The same below.

表4 不同施氮处理时玉米植株氮素吸收的影响(kg·hm<sup>-2</sup>)Table 4 Effect of different N managements on nitrogen absorption of maize plant(kg·hm<sup>-2</sup>)

处理 Treatments	2011年		2012年	
	双城 Shuangcheng	肇源 Zhaoyuan	宾县 Binxian	哈尔滨 Harbin
处理 1	98.4±10.1e	87.4±9.8e	118.3±4.5f	110.0±6.6f
处理 2	159.1±9.1b	139.4±10.4bc	177.3±12.1bc	151.3±8.9bcd
处理 3	164.8±4.7b	153.1±7.3ab	183.9±4.1bc	166.4±15.3abc
处理 4	180.4±11.5a	159.6±13.3a	195.7±13.5ab	170.5±11.1ab
处理 5	178.0±11.8a	156.8±11.2a	198.2±14.0a	181.1±13.3a
处理 6	146.5±11.2c	139.8±9.1bc	170.9±7.7cd	150.7±14.3cd
处理 7	140.7±8.4c	129.4±7.5cd	166.3±7.8cde	145.4±9.8cde
处理 8	134.7±9.4cd	121.8±5.4d	153.6±13.5de	142.1±4.3de
处理 9	127.5±7.2d	116.7±11.4d	151.4±2.0e	138.9±11.2e

表5 不同施氮处理玉米的氮素利用效率

Table 5 Effect of different N managements on nitrogen use efficiency

地点 Site	处理 Treatments	氮肥利用率 NUE/%	氮肥农学效率 ANUE/kg·kg <sup>-1</sup> N	氮肥贡献率 FCR/%	地点 Site	处理 Treatments	氮肥利用率 NUE/%	氮肥农学效率 ANUE/kg·kg <sup>-1</sup> N	氮肥贡献率 FCR/%
双城	处理 2	34.7±5.6bc	15.5±3.5bc	30.0±5.2b	肇源	处理 2	29.7±5.2e	16.8±2.7bc	35.5±4.6b
	处理 3	37.9±5.9b	17.7±2.1b	32.8±6.2b		处理 3	37.5±5.8bc	18.3±2.6b	37.5±7.1b
	处理 4	46.9±7.5a	25.1±4.9a	40.9±6.7a		处理 4	41.3±6.4a	22.2±3.7a	42.2±7.9a
	处理 5	45.5±6.3a	23.3±6.2a	39.2±6.4a		处理 5	39.7±3.8ab	23.1±3.4a	43.2±6.5a
	处理 6	36.2±5.2bc	16.2±3.5b	25.3±3.5c		处理 6	39.4±4.5abc	16.1±3.6bc	28.7±4.6c
	处理 7	31.8±4.6d	11.4±1.1d	19.3±2.5d		处理 7	31.6±2.8d	14.5±2.6c	26.6±3.5c
	处理 8	41.7±2.8ab	15.4±3.2bc	17.5±2.9d		处理 8	39.5±4.2ab	19.1±2.1b	23.8±2.8d
	处理 9	33.4±3.9c	12.1±2.8cd	14.2±1.7e		处理 9	33.7±4.3c	16.5±1.6bc	21.2±2.4d
	宾县	处理 2	33.7±6.3d	14.3±3.2c		26.4±7.3cd	哈尔滨	处理 2	23.6±3.4d
处理 3		37.5±5.2c	15.8±1.2c	28.4±6.1bc	处理 3	32.2±3.5bc		12.6±1.6bc	23.7±3.6bc
处理 4		44.2±8.6a	19.4±3.9a	32.8±4.3a	处理 4	34.6±4.8b		17.3±2.5a	29.8±4.8a
处理 5		45.7±7.2a	16.9±4.8bc	29.7±3.8ab	处理 5	40.6±4.1a		14.9±3.1ab	26.8±4.1ab
处理 6		39.5±3.2abc	19.8±3.6a	27.4±1.6bc	处理 6	30.6±3.4c		14.7±1.4ab	21.5±2.9bcd
处理 7		36.1±1.9c	18.0±4.7ab	25.6±4.5cd	处理 7	26.6±3.1d		12.4±0.8bc	18.9±1.8de
处理 8		40.6±6.9ab	20.7±5.8a	20.5±6.2d	处理 8	36.9±3.2ab		17.5±3.0a	17.6±3.2e
处理 9		38.0±3.7bc	16.8±1.2bc	17.3±2.8e	处理 9	33.2±1.5bc		17.0±2.7a	17.2±2.4e

39.7%;宾县试验点为 44.2%和 45.7%,哈尔滨试验点为 34.6%和40.6%;哈尔滨试验点两处理之间差异显著,其他地点两处理之间差异不显著。不同氮肥种类相同氮肥用量条件下(100%、75%、50%氮肥用量),基施控释尿素处理较基施普通尿素处理氮肥利用率平均分别提高 5.9%、4.9%和 5.1%。4 个试验点各处理氮肥农学效率与氮肥利用率变化趋势基本相同,同等氮量下(100%、75%、50%氮肥用量),基施控释尿素处理较普通尿素处理氮肥农学效率平均分别提高 2.0、2.6 kg·kg<sup>-1</sup> 和 2.6 kg·kg<sup>-1</sup>。随着施氮量的增加氮肥贡献率增加,除宾县和哈尔滨地区的处理 5 与处理 6 的氮肥

贡献率差异不显著外,处理 4、处理 5 均显著高于其他处理。双城试验点为 40.9%和 39.2%;肇源试验点为 42.2%和 43.2%;宾县试验点为 32.8%和 29.7%;哈尔滨试验点为 29.8%和 26.8%;两处理间差异均不显著。相同氮肥用量下(100%、75%、50%氮肥用量),基施控释尿素比基施普通尿素,氮肥贡献率分别平均增加 2.8%、3.1%和 2.4%,说明相同管理条件下包膜控释尿素能够提高氮肥贡献率。

### 2.3 控释尿素对土壤氮素平衡的影响

4 个试验点平均结果可以看出(表 6),玉米收获后,0~80 cm 土壤氮素残留量和表观损失量随着施氮量

的增加而增加, 施氮处理与不施氮处理间差异显著。与处理 2 相比, 处理 3、处理 4、处理 5 显著降低了氮素的表观损失量, 分别降低 15.0、12.6、23.9 kg·hm<sup>-2</sup>。不同氮肥种类相同施氮量条件下(100%、75%、50%氮肥用量), 基施控释尿素较基施普通尿素(处理 3 与处理 2 相比, 处理 6 与处理 7 相比, 处理 8 与处理 9 相比)降低了氮素表观损失量。氮素表观亏缺量随着氮肥用量的增加而降低, 不施氮肥(处理 1)土壤氮素显著亏缺, 亏缺量达到 115.2 kg·hm<sup>-2</sup>。相同氮肥用量条件下(100%氮肥用量), 处理 5 的氮素表观亏缺量显著高于处理 2、处理 3 和处理 4, 而处理 2 的氮素表观亏缺量最低。不同氮肥种类相同施氮量条件下(100%、75%、50%氮肥用量), 基施控释尿素均较基施普通尿素(处理 3 与处理 2 相比, 处理 6 与处理 7 相比, 处理 8 与处理 9 相比)增加了氮素表观亏缺量。

### 3 讨论

氮肥管理的最终目的是既保证作物高产, 又不会造成土层硝态氮大量积累及损失, 达到经济效益和环境效益的统一<sup>[17]</sup>。王寅等<sup>[18]</sup>在吉林省中部玉米主产区设置连续 2 年的定点大田试验, 研究结果表明, 东北春玉米施 N 量为 185 kg·hm<sup>-2</sup> 条件下, 适宜的控释氮肥掺混比例在 30% 左右。与尿素一次性全施相比, 控释氮肥与尿素掺混施用显著提高了春玉米产量和氮肥利用率, 降低表观损失率。本文通过两年四点田间试验研究结果表明, 黑龙江春玉米施 N 量为 175 kg·hm<sup>-2</sup> 条件下, 适宜的控释氮肥掺混比例为 60%。与王寅等<sup>[18]</sup>的研究结果基本一致, 其最佳控释尿素比例

略有不同, 主要是由于不同试验设置的控释尿素比例有所差异, 另外也与试验所用控释尿素种类、土壤肥力、气候等有关。夏伟光等<sup>[19]</sup>采用田间试验方法研究了控释尿素不同施用条件对冬小麦产量、氮素利用和经济效益的影响, 无论是产量效应还是氮素利用效应, 树脂包膜控释尿素(CRU)处理总体优于普通尿素(PU)处理, 尤其树脂包膜控释尿素和普通尿素配施(40%CRU+40%PU)效果最佳。本试验结果也表明, 100%普通尿素或 100%控释尿素一次性基施效果并不理想; 40%普通尿素与 60%控释尿素掺混一次性基施处理与普通尿素 40%基施结合 60%追施处理效果相当。若 100%施用普通尿素, 则易造成玉米生长的前期可供应氮量高于玉米实际需求量, 一方面造成肥料氮素的浪费和环境污染风险(表 5 和表 6), 另一方面使得玉米生长后期氮素养分供应不足, 造成植株脱肥, 影响产量的提高; 若 100%施用控释尿素, 一方面是由于控释肥的成本较高, 控释肥料价格一般比普通氮肥价格高 2~9 倍<sup>[20-21]</sup>, 全部使用经济效益不佳; 另一方面是由于田间生产中气候具有不确定性, 即作物生育期气温和降水量年份之间各不相同, 而控释尿素的养分释放主要受水分和温度的影响<sup>[22]</sup>, 100%采用控释尿素一次性基施对稳定和提高玉米产量具有一定的风险。采用 40%普通尿素与 60%控释尿素一次性基施效果较好的原因主要是由于黑龙江省早春气候相对冷凉, 玉米植株小, 对养分需求量低, 一次性施肥中施用的 40%的普通尿素足以保证玉米生育前期对氮素养分的需求; 而随着玉米植株的生长, 至拔节期对氮素需求量增加, 结合黑龙江省雨热同季的气候

表 6 玉米生育期 0~80 cm 土壤氮素平衡(kg·hm<sup>-2</sup>)

Table 6 Nitrogen balance during the growth season of maize (kg·hm<sup>-2</sup>)

处理 Treatments	氮输入 N input			氮总输入 Total N input	氮输出 N output			氮表观盈亏量 Nitrogen surplus
	施氮量 N supply	起始矿质氮 Initial N mineralization	净氮矿化量 N net mineralization		作物吸氮量 N crop uptake	残留矿质氮 Residual N mineralization	氮表观损失 N apparent loss	
处理 1	0	90.5	115.2	205.7	103.5±13.5f	102.2±12.6e	—	-115.2±10.6a
处理 2	175	90.5	115.2	380.7	156.8±15.9c	148.6±14.8ab	75.3±7.1a	-39.9±5.7e
处理 3	175	90.5	115.2	380.7	167.1±12.7b	153.3±15.1a	60.3±6.5b	-54.9±6.8d
处理 4	175	90.5	115.2	380.7	176.6±15.3a	141.4±13.9ab	62.7±6.7b	-52.5±6.5d
处理 5	175	90.5	115.2	380.7	178.5±17.0a	150.8±15.4a	51.4±5.9c	-63.8±7.2c
处理 6	133	90.5	115.2	338.7	152.0±13.4c	138.2±13.6bc	48.5±4.2c	-66.7±6.8c
处理 7	133	90.5	115.2	338.7	145.5±15.4d	134.6±12.9c	58.6±5.7c	-56.6±5.5c
处理 8	87	90.5	115.2	292.7	138.1±13.3e	127.8±10.9c	26.8±3.9d	-88.4±8.6b
处理 9	87	90.5	115.2	292.7	133.6±14.9e	118.4±11.9d	40.7±4.3d	-74.5±7.8b

注: 表中数据为 4 个试验点平均值, 同列数据中不同字母表示处理间差异显著(P<0.05)。

Note: The value is average of four experiments, different letters in the same column mean 5% significant difference among different treatments.

特征,此时60%的控释尿素和部分盈余的普通尿素同时发挥作用,满足玉米对氮素的需求;另外,控释尿素具有缓慢释放的特点,在生育后期也能够维持玉米对氮素养分的需求。

系统的氮素输出以植株吸收带走氮素为主要方式<sup>[18]</sup>,本试验研究结果表明,基施控释尿素均较基施普通尿素增加了氮素亏缺量,以100%基施普通尿素的处理氮素亏缺量最低,其主要原因是由于控释尿素处理植株氮素吸收量高于普通尿素。戴明宏等<sup>[15]</sup>研究了不同氮肥管理模式对华北平原春玉米氮素盈亏和平衡的影响,结果表明,不施氮处理氮素亏缺量最大,由于经验施氮量过大,造成氮素表观损失率和残留率增加,推荐施氮量则能够保持产量,减少氮素损失。因施肥不合理导致氮肥效率不高和氮肥损失的问题在东北春玉米生产上也越来越引起重视。本试验结果也以不施氮处理氮素亏缺量最大,达到 $115.2\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,施氮肥减少了氮素亏缺量,但施用的氮素有很大一部分通过挥发和淋洗而损失,因此,施用氮肥处理的氮素亏缺量并不等于施氮量。安景文等<sup>[23]</sup>应用不同肥料配方对玉米进行一次性深施肥试验,研究结果表明,在等养分条件下一次性深施肥有助于玉米对养分的吸收;施用包膜尿素和一次性深施肥能提高氮肥利用率;乔云发等<sup>[24]</sup>采用密闭室法测定黑土氨挥发通量,结果表明,在相同施氮量的条件下,氨挥发损失率随施肥深度的增加而减少,可见,深施肥可以提高肥料利用率,减少氮肥损失。本试验研究结果表明,施氮量为 $\text{N } 175\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,氮的表观亏缺量为 $39.9\sim 63.8\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,最优的处理4也达到 $52.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,一方面可能是由于本试验的氮肥用量偏低,另一方面也可能与施肥方式有关,本试验采用当地农民习惯施肥方式,氮肥基施深度为 $10\text{ cm}$ ,追肥施在垄沟,犁地时回土覆盖,覆盖深度较浅,这样的施肥方式势必会造成肥料损失量加大,使得氮素表观亏缺量增加,因此,是否可以在该试验氮肥用量的基础上适当提高氮肥用量,还有待于进一步的研究。

#### 4 结论

(1)在相同磷、钾肥水平上,春玉米产量、植株氮素吸收量均随着施氮量的增加而增加。玉米产量、植株吸氮量、氮肥表观利用率、氮农学效率在处理4(40%普通尿素和60%控释尿素做基肥)和处理5(普通尿素40%基肥结合60%追肥)之间差异不显著。

(2)在相同氮素施用水平下(100%、75%、50%氮

肥用量),基施控释尿素比基施普通尿素玉米产量平均分别增加 $391$ 、 $427$ 、 $291\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ;氮肥表观利用率提高 $5.9\%$ 、 $4.9\%$ 和 $5.1\%$ ;氮肥农学效率提高 $2.0$ 、 $2.6\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $2.6\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;氮肥贡献率增加 $2.7\%$ 、 $3.1\%$ 和 $2.4\%$ 。

(3)氮素表观损失量随着氮肥用量的增加而增加,而氮素表观亏缺量随着氮肥用量的增加而降低。与100%普通尿素作基肥一次性施入相比,100%控释尿素处理、40%普通尿素和60%控释尿素混合作基肥处理分别降低氮素表观损失量 $15.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $23.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ;不施氮肥土壤氮素显著亏缺。

(4)从玉米产量、氮素利用效率及氮素损失等方面综合考虑,普通尿素与控释尿素分别以40%和60%的比例混合施用在黑龙江省玉米生产上是可以推广和借鉴的氮素管理方式。

#### 参考文献:

- [1] 张夫道,王玉军.我国缓/控释肥料的现状和发展方向[J].中国土壤与肥料,2008(4):1-4.  
ZHANG Fu-dao, WANG Yu-jun. Current situation and development trend of slow/controlled-release fertilizer in China[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2008(4):1-4. (in Chinese)
- [2] 樊小林,刘芳,廖照源,等.中国控释肥料研究的现状和展望[J].植物营养与肥料学报,2009,15(2):463-473.  
FAN Xiao-lin, LIU Fang, LIAO Zhao-yuan, et al. The status and outlook for the study of controlled-release fertilizers in China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(2): 463-473. (in Chinese)
- [3] Mosisa W, Marianne B, Gunda S, et al. Nitrogen uptake and utilization in contrasting nitrogen efficient tropical maize hybrids[J]. *Crop Sci*, 2007, 47(2):519-528.
- [4] 薛高峰,张贵龙,孙焱鑫,等.包膜控释尿素(追施)对冬小麦生长发育及土壤硝态氮含量的影响[J].农业环境科学学报,2012,31(2):377-384.  
XUE Gao-feng, ZHANG Gui-long, SUN Yan-xin, et al. Influences of topdressing controlled-release coated urea on plant growth and soil  $\text{NO}_3^-$ -N content of winter wheat[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(2):377-384. (in Chinese)
- [5] 衣文平,孙哲,武良,等.包膜控释尿素与普通尿素配施对冬小麦生长发育及土壤硝态氮的影响[J].应用生态学报,2011,22(3):687-693.  
YI Wen-ping, SUN Zhe, WU Liang, et al. Effects of coated controlled release urea combined with conventional urea on winter wheat growth and soil  $\text{NO}_3^-$ -N[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(3): 687-693. (in Chinese)
- [6] 杜君,孙克刚,张运红,等.控释尿素对水稻生理特性、氮肥利用率及土壤硝态氮含量的影响[J].农业资源与环境学报,2016,33(2)134-141.  
DU Jun, SUN Ke-gang, ZHANG Yun-hong, et al. Effects of controlled release urea on physiological characteristics and nitrogen use efficiency

- of rice and  $\text{NO}_3^-$ -N contents in soil [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(2): 134-141. (in Chinese)
- [7] 徐明岗, 李菊梅, 李东初, 等. 控释氮肥对双季水稻生长和氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(5): 1010-1015.  
XU Ming-gang, LI Ju-mei, LI Dong-chu, et al. Effects of controlled release nitrogen fertilizer on growth and fertilizer use efficiency of double rice in southern China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(5): 1010-1015. (in Chinese)
- [8] 孙克刚, 和爱玲, 李丙奇. 砂姜黑土区控释尿素与普通尿素掺混对小麦-玉米轮作定位产量及氮肥利用率的影响[J]. 磷肥与复肥, 2010, 25(2): 63-64.  
SUN Ke-gang, HE Ai-ling, LI Bing-qi. The effect of controlled-release urea and conventional urea on wheat-corn crop rotation yield and nitrogen utilization efficiency in lime concretion black soil area[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2010, 25(2): 63-64. (in Chinese)
- [9] 曹宁, 陈志怡, 闫飞, 等. 控释尿素对玉米产量、氮肥利用率及土壤氮素的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2012, 34(1): 86-89.  
CAO Ning, CHEN Zhi-yi, YAN Fei, et al. Effect of control release urea on spring maize yield, N use efficiency and soil nitrogen[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2012, 34(1): 86-89. (in Chinese)
- [10] 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, 91.  
LI Wei, LI Xu-hua, TANG Shen-xin, et al. Effect of controlled-release urea combined with common urea on the grain yields of summer maize and distribution of soil ammonium and nitrate content[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(6): 68-71, 91. (in Chinese)
- [11] 郑雨, 唐树梅, 李玉影, 等. 控释尿素对黑龙江省玉米氮肥利用率及产量的影响[J]. 玉米科学, 2014, 22(1): 127-131.  
ZHENG Yu, TANG Shu-mei, LI Yu-ying, et al. Effects of controlled release urea on maize yield and apparent N recovery rates in Heilongjiang Province[J]. *Journal of Maize Science*, 2014, 22(1): 127-131. (in Chinese)
- [12] 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.  
JI Jing-hong, LI Yu-ying, LIU Shuang-quan, et al. Effects of controlled-release urea on grain yield of spring maize, soil nitrate nitrogen content and nitrogen balance [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46(3): 669-675. (in Chinese)
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007.  
BAO Shi-dan. Soil agricultural-chemical analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2007. (in Chinese)
- [14] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 冬小麦与夏玉米轮作体系中氮肥效应及氮素平衡研究[J]. 中国农业科学, 2002, 35(11): 1361-1368.  
JU Xiao-tang, LIU Xue-jun, ZHANG Fu-suo. Study on effect of nitrogen fertilizer and nitrogen balance in winter wheat and summer maize rotation system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(11): 1361-1368. (in Chinese)
- [15] 戴明宏, 陶洪斌, 王利纳, 等. 华北平原春玉米种植体系中土壤无机氮的时空变化及盈亏[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(3): 417-423.  
DAI Ming-hong, TAO Hong-bin, WANG Li-na, et al. Spatial-temporal dynamics of soil mineral nitrogen and balance analysis during spring maize season [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(3): 417-423. (in Chinese)
- [16] 朱兆良. 关于土壤氮素研究中的几个问题[J]. 土壤学进展, 1989(2): 1-9.  
ZHU Zhao-liang. Several problems in the study of soil nitrogen[J]. *Progress of Soil Science*, 1989(2): 1-9. (in Chinese)
- [17] Cui Z L, Zhang F S, Chen X P, et al. On farm estimation of indigenous nitrogen supply for site specific nitrogen management in the North China plain[J]. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 2008, 81: 37-47.
- [18] 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.  
WANG Yin, FENG Guo-zhong, ZHANG Tian-shan, et al. Effects of mixed application of controlled-release N fertilizer and common urea on grain yield, N uptake and soil N balance in continuous spring maize production[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(3): 518-528. (in Chinese)
- [19] 夏伟光, 武际, 高凤梅, 等. 控释尿素不同施用条件下冬小麦产量和氮素利用效应[J]. 农业资源与环境学报, 2014, 31(1): 38-44.  
XIA Wei-guang, WU Ji, GAO Feng-mei, et al. Effects of controlled release urea on wheat yield and nitrogen utilization efficiency under different applied conditions[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2014, 31(1): 38-44. (in Chinese)
- [20] Shaviv A, Mikkelsen R L. Slow release fertilizers for a safer environment maintaining high agronomic use efficiency[J]. *Fert Res*, 1993, 35: 1-12.
- [21] Shoji S, Kanno H. Use of polyolefin-coated fertilizers for increasing fertilizer efficiency and reducing nitrate leaching and nitrous oxide emissions[J]. *Fert Res*, 1994, 39: 147-152.
- [22] Kobayashi A, Fujisawae, Hanyu T. A mechanism of nutrient release from resin-coated fertilizers and its estimation by kinetic methods, I: Effect of water vapor pressure on nutrient release[J]. *Jpn J Soil Sci Plant Nutr*, 1997, 68(1): 8-13. (in Japanese)
- [23] 安景文, 汪仁, 包红静, 等. 不同肥料配方一次性施肥对玉米产量和养分吸收的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(4): 874-877.  
AN Jing-wen, WANG Ren, BAO Hong-jing, et al. Effects of basal dressing total fertilizers once with different fertilizer formulas on product and nutrient uptake of maize [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(4): 874-877. (in Chinese)
- [24] 乔云发, 韩晓增, 赵兰坡, 等. 黑土氮肥氨挥发损失特征研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(1): 198-201.  
QIAO Yun-fa, HAN Xiao-zeng, ZHAO Lan-po, et al. Researches on ammonia volatilization loss characters of nitrogen fertilizer from black soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(1): 198-201. (in Chinese)