

包膜尿素不同配比减施对土壤无机氮含量及玉米氮素吸收的影响

冯小杰, 战秀梅, 王雪鑫, 陈坤, 彭靖, 韩晓日

(沈阳农业大学土地与环境学院/土肥资源高效利用国家工程实验室, 沈阳 110866)

摘要:【目的】研究包膜尿素与普通尿素不同配施比例对氮素释放及玉米氮素吸收的影响,旨在筛选有利于东北春玉米高产及氮素高效利用的包膜肥料与普通尿素比例,为控释氮肥在东北地区春玉米生产上的推广应用提供科学依据。【方法】2017年在辽宁省沈阳市和海城市两地以当地主栽品种东单6531和铁研358开展田间试验。供试肥料:树脂包膜尿素和普通尿素。两个试验区均设置了不施氮处理(CK0)、普通尿素常规施氮量(CK)和减氮对照处理(CK1)、树脂包膜尿素较CK减氮处理(T0);沈阳试验区还设置了3个树脂包膜尿素与普通尿素不同配比及减氮处理(T1、T2、T3),海城试验区设置了两个处理(T1、T2)。T1、T2、T3处理包膜尿素和普通尿素的配施比例分别为8:2、6:4、4:6;沈阳试验区常规氮肥用量为244 kg·hm⁻²,减氮处理施氮量为220 kg·hm⁻²;海城试验区常规氮肥用量为217 kg·hm⁻²,减氮处理施氮量为195 kg·hm⁻²。玉米生长季内各生育时期分别采集土壤和植株样品,测定土壤无机氮含量和植株不同部位养分含量,每个小区单独采收记录产量。【结果】包膜尿素与普通尿素配施能显著提高玉米产量($P < 0.05$),且随着配施比例的增加,产量呈先增加后降低趋势,其中T2处理的玉米产量最高(10 250 kg·hm⁻²),CK1产量最低(9 307 kg·hm⁻²)。在等氮素条件下,玉米产量表现为T2>T3>T1>T0>CK1,籽粒产量较CK1处理增产幅度为3.89%—25.76%。在减氮10%条件下,T2处理产量与CK处理相比差异不显著。包膜尿素与普通尿素配施能显著提高玉米生育前期土壤中无机氮含量,树脂包膜尿素可以为玉米中后期生长提供氮源,且在等氮条件下,随着包膜肥料与普通尿素配比增加,氮素表观利用率和氮肥农学效益均呈先升高后降低趋势,其中均以T2处理最高,CK1处理最低,两地结果一致。【结论】包膜尿素与普通尿素配施处理的春玉米产量、氮肥利用率和氮肥农学效益均优于普通尿素处理,其中以T2处理包膜尿素与普通尿素配比为6:4,效果最好;根据两种肥料不同时期的释放特点,通过拟合曲线,在辽中南地区,当62%包膜尿素搭配38%普通尿素条件下,产量、氮素表观利用率和经济效益最高且最合理,可以充分发挥普通尿素和包膜肥料优势,可有效增加春玉米中后期土壤无机氮供应能力,获得显著的增产效果,提高经济效益。

关键词:树脂包膜尿素;土壤无机氮;氮肥利用效率;春玉米;产量;减氮

Effects of Soil Inorganic Nitrogen and Nitrogen Absorbing by Maize Under the Reduced Application of Coated Urea at Different Proportions

FENG XiaoJie, ZHAN XiuMei, WANG XueXin, CHEN Kun, PENG Jing, HAN XiaoRi

(College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University/National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Shenyang 110866)

Abstract:【Objective】By studying the effects of nitrogen releasing and nitrogen absorbing by maize under the application of different ratios with coated urea and ordinary urea, this paper aimed to screen the optimal ratio, which was beneficial to the outputs of spring maize in the northeast China and nitrogen utilization efficiency, and to provide the basis for the generalizing of controlled

收稿日期: 2018-11-21; 接受日期: 2019-01-14

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFD0300303)

联系方式: 冯小杰, E-mail: fengxiaojie920218@163.com. 通信作者战秀梅, E-mail: xiumeizhan@163.com

release nitrogen fertilizer on maize. 【Method】 Field experiments were set in Shenyang and Haicheng of Liaoning province in 2017, and crop strains were Dongdan6531 and Tieyan358, respectively. The experiment fertilizers were ordinary and coated urea. The treatments in both set points included blank control (CK0), ordinary urea nitrogen control (CK) and decreased urea N control treatments (CK1), decreased coated urea N control (T0) compared with (CK) treatments; three different ratios urea between ordinary and coated were arranged in Shenyang (T1, T2 and T3) and two in Haicheng (T1 and T2). The ratios of T1, T2 and T3 were 8 : 2, 6 : 4 and 4 : 6, respectively; the ordinary urea control rate was $244 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and decreased coated urea N control was $220 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ in Shenyang and that were $217 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $195 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ in Haicheng, respectively. Soil and plant samples were collected according to the maize growing season, respectively. Determination of the content of soil inorganic nitrogen and different plant parts nutrient, and the biological yield of different treatments were also measured. 【Result】 The treatments of coated urea plus the ordinary increased the maize yield significantly ($P < 0.05$), and with the ratio increasing, the yield first rise and then drop. The yield of T2 was the highest ($10\,250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), and CK1 was the lowest ($9\,307 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$). The yields of equal N inputting treatments were in the order as $T2 > T3 > T1 > T0 > CK1$, and the grain yield increased 3.89%-25.76% compare to CK1, but there was no significant difference between T2 and CK. The soil inorganic N content was increased at the early maize growth stage applying with either type urea, and the soil N content was rich at the late maize growth stage applying with coated urea. Under the same N input treatments, the N use efficiency (NUE) and agronomic efficiency of N fertilizer (AEN) applied first rise and then drop with the ratio increasing, and T2 was the highest, CK1 was the lowest, the results in different place was the same. 【Conclusion】 Coated urea plus ordinary urea performed better than other treatments on yield, AEN and NUE, and T2 (i.e. 6 : 4 of the coated and ordinary urea) was the best. According to the characteristics of coated urea and ordinary urea, we fitted a curve for those results, and made it to know that 62% coated urea plus 38% ordinary urea input could get the best NUE and maize yield in South Central Liaoning, which could increase soil N content at the late of crop growth stage by using coated urea and ordinary urea to their advantages fully, gaining yield and economic benefits.

Key words: resin coated urea (RCU); inorganic nitrogen; NUE; spring maize; yield; decreased-nitrogen

0 引言

【研究意义】春玉米生物累积量大,对氮肥敏感且需求数量和强度都非常高,合理的氮肥运筹是提高玉米产量的重要途径。研究表明,一次性施用大量普通速效氮肥,一般会造成苗期烧苗^[1]、后期脱氮早衰和氮肥利用率下降等问题^[2],而分次施肥又大大增加了劳动力投入^[3],包膜肥料的研究为解决这些问题提供了新的思路。包膜肥料主要是在肥料颗粒表层包被上控制养分释放的包膜材料,调节养分释放的肥料,使控释时间,即转化为植物有效利用养分的释放速率与作物吸收规律相同步^[4]。主要种类有物理型和物理化学型,其中最为常见的是树脂包膜肥料和硫包膜尿素等^[5]。但是由于包膜肥料的市场价格一般比普通肥料高 2.5—8 倍^[6],导致其难以大面积推广应用,控释肥的用量仅占化肥用量的 0.15%,主要用于经济价值较高的水果、蔬菜、花卉和草坪等植物^[7];另外包膜肥料养分释放受土壤温度和水分等环境因素影响较大,种、肥同播方式易造成缓释肥前期养分释放不足,影响玉米苗期生长,后期养分过多,造成玉米贪青晚熟^[8]。因此研究包膜肥料与普通尿素配施既有利于降低肥料成本,又可调控苗期养分供应,对丰富玉米施肥技术有重要意义。【前人研究进展】佟玉欣等^[9]

和韩蔚娟等^[1]对东北地区春玉米产量和氮素需求之间关系的研究表明,追施氮肥能增加玉米籽粒中氮浓度并提高玉米产量;基施不同新型肥料能满足玉米整个生长季的需肥,且能达到增产和提高肥料利用率以及减少人工投入的效果,而增收不显著。为了降低成本,增加农民收益以及便于在大田作物上大面积推广应用,司贤宗等^[10]和黄巧义等^[11]在夏玉米上就包膜肥料与普通尿素配施以及合适比例的应用进行了可行性研究。FUJISAWA 等^[12]、张玉玲等^[13]和衣文平等^[14]探究了环境因素对控释氮肥释放速率的影响,结果表明控释肥释放期长短会随温度升高而减少,土壤温度在 10—25℃ 内,每升高 5℃,释放速率常数一般提高 1 倍;土壤水分含量越少,控释肥养分溶出速率常数越小,当土壤含水量高于田间持水量的 40%,控释肥料的养分释放速率和释放期才不受土壤水分状况的影响。【本研究切入点】诸多研究表明,包膜肥料与普通尿素配施在夏玉米上表现出良好的增产效果,而针对东北地区春玉米前期土壤温度低和生长周期长的特点,就包膜肥料与普通尿素配施比例的应用研究鲜有报道。为此,笔者在辽中南地区开展了包膜肥料与普通尿素配施在春玉米应用上的研究,并探究了不同比例施用的效果。【拟解决的关键问题】本研究通过在辽中南地区开展大田试验,

探究包膜肥料与普通尿素不同配施比例及减氮施用对氮素释放与玉米氮素吸收的影响,旨在筛选有利于春玉米高产及氮素高效利用的包膜肥料与普通尿素比例,为控释氮肥在辽中南地区春玉米生产上的推广应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点及材料

春玉米田间小区试验于 2017 年 5—9 月在沈阳农业大学北山科研基地(沈阳试验区)($40^{\circ}48'N$, $123^{\circ}33'E$)和沈阳农业大学海城教学实习基地(海城试验区)($40^{\circ}48'N$, $122^{\circ}37'E$)进行。沈阳农业大学北山科研基地处于松辽平原,年平均降雨量 574—684 mm,年平均气温 $7.0\text{—}8.1^{\circ}C$,无霜期为 148—180 d;沈阳农业大学海城教学实习基地位于辽宁南部,辽东半岛北端,属暖温带大陆性季风气候区,年平均气温 $10^{\circ}C$ 以上,年积温在 $3\,000\text{—}3\,100^{\circ}C$,无霜期 170 d 左右,年降雨量在 600—800 mm。土壤类型均为棕壤,供试肥料为普通尿素(含 $N46\%$)、过磷酸钙(含 $P_2O_5\,14\%$)、硫酸钾(含 $K_2O\,50\%$)、热固性树脂包膜尿素(包膜尿素释放期为 90 d,含 $N44\%$)。根据辽宁省 21 站近 30 年月平均降雨量和温度的变化曲线,趋势分别为降雨量从 6 月份开始增加,7 月份陡升,达到峰值,8 月稍有回落,9 月急剧减少^[15];温度从 5 月份开始增加,6、7 月份陡升,7 月达到峰值,8 月稍有回落,9 月急剧减少^[16]。供试土壤理化性状及试验期间温度、降雨情况见表 1 和图 1。

1.2 试验设计

1.2.1 春玉米田间小区试验 于 2017 年在沈阳和海城两地布置了春玉米田间小区试验。两个试验区均设置了不施氮处理(CK0)、普通尿素常规施氮量(CK)和减氮对照处理(CK1)、树脂包膜尿素较 CK 减氮处理(T0);沈阳试验区还设置了 3 个较 CK 减氮的树脂包膜尿素与普通尿素不同配比处理(T1、T2、T3);T1、T2、T3 处理的包膜尿素与普通尿素氮素配施比例分别为 8:2、6:4、4:6。海城试验区设置了两个处理(T1、T2)。两个试验区常规施氮量是根据辽宁省测土配方施肥项目推荐施肥量确定,减氮处理氮肥用量是在常规氮肥用量基础上减氮 10%;因此沈阳试验区常规氮肥用量为 $244\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,减氮处理施氮量为 $220\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,施磷量(P_2O_5) $97.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,施钾量(K_2O) $101.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,各处理磷、

钾肥用量相同;海城试验区常规氮肥用量为 $217\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,减氮处理施氮量为 $195\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,施磷量(P_2O_5) $75\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,施钾量(K_2O) $90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,各处理磷、钾肥用量相同。沈阳试验区于 5 月 8 日播种,9 月 26 日收获,供试玉米品种为东单 6531;海城试验区于 5 月 11 日播种,9 月 24 日收获,供试玉米品种为铁研 358。所有肥料均作基肥在播种前一次性以垄施方式施到种子行侧下方 8—10 cm 土层。小区面积 30 m^2 。各处理均 3 次重复,随机区组排列。田间管理方法同当地。

1.2.2 树脂包膜肥料养分释放动态试验 选择孔径 100 目的尼龙网料,将其缝制成长 10 cm,宽 8 cm 的网袋。将包膜尿素过 2 mm 孔径的网筛,称取过筛后的根据 $244\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $66\,000\text{ 株}/\text{hm}^2$,计算得到包膜尿素 8.03 g,装入已制制作好的网袋中,用缝纫机封口,每袋拴上具有防水编号的塑料标签 2 副。网袋制作好后,在种植前对试验地进行翻土、整地。然后在将要播种的种子行正下方挖一条深 15 cm,宽 10 cm 的沟,自然整平沟底,将肥料网袋按顺序平铺在沟底,使实际释放率尽可能与真实释放率相一致。根据玉米品种种植密度确定袋与袋的间隔,并使网袋中的肥料颗粒均匀散开,覆土约 5 cm,播种,继续覆土至沟平。包膜肥料田间试验取样:砍掉肥料网袋上面的玉米植株,用小铲小心的将网袋挖出,按照相同方法从不同的 3 行分别挖取 1 袋肥料。取样时间分别为播种后 1、3、7、14、21、38、63、103、137 d。

1.3 测定项目与方法

分别在施肥前、施肥后 7 d、玉米苗期(20 d)、拔节期(40 d)、大喇叭口期(55 d)、抽雄期(68 d)、乳熟期(100 d)、成熟期(130 d),采集 0—20、20—40、40—60、60—80 和 80—100 cm 土层的土样,测定土壤无机氮含量及含水量。

分别于拔节期、大喇叭口期、抽雄期、乳熟期、成熟期,取 5 株长势均匀一致的植株,按器官分离,在 $105^{\circ}C$ 杀青 30 min 后, $80^{\circ}C$ 烘至恒重,测定玉米氮素吸收量。

土壤无机氮(土壤鲜样)用 $0.01\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ CaCl}_2$ 浸提,采用连续流动分析仪(AA3, SEAL Analytical, 德国)测定。玉米全氮含量用浓 $\text{H}_2\text{SO}_4+\text{H}_2\text{O}_2$ 消煮,用凯氏定氮法测定。包膜肥料氮肥释放速率用差重法进行测定^[17]。

氮素相关参数计算:

植株氮素积累量 (nitrogen accumulation amount, NAA, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) = 单株干重 \times 植株含氮量;

氮肥农学效率 (agronomic efficiency of applied nitrogen, AEN, $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$) = (施氮小区籽粒产量 - 不施氮小区籽粒产量) / 施氮量;

氮素表观利用率 (recovery efficiency of applied nitrogen, REN, %) = (施氮区植株地上部吸氮量 - 不施氮区植株地上部吸氮量) / 施氮量 $\times 100$;

植株氮素的增加速率 (%) = ((某个生育期的氮素含量 - 上个生育期的氮素含量) / 上个生育期的氮素

含量) / 天数。

1.4 产量测定

玉米成熟期每处理小区测产 15 m^2 , 调查株数、双穗率和空秆率, 籽粒按含水率 14% 折算产量。

1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 整理数据、SigmaPlot 10.0 作图和 SPSS 19.0 对数据进行单因素方差分析, 两地间土壤无机氮和玉米氮素积累试验数据趋势相近, 用沈阳试验区数据呈现, 采用 Duncan 法进行显著性检验, 显著水平为 $P < 0.05$ 。

表 1 供试土壤基本理化性状 (0—20 cm)

Table 1 Soil properties of the experimental sites

试验地点 Experimental sites	pH	有机质 Organic Matter ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	无机氮 Inorganic N ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全氮 Total N ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	解碱氮 Available N ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效磷 Available P ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效钾 Available K ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
沈阳 Shenyang	5.14	14.61	8.53	0.83	91.40	7.60	89.80
海城 Haicheng	5.14	22.30	18.25	0.86	129.60	27.42	122.76

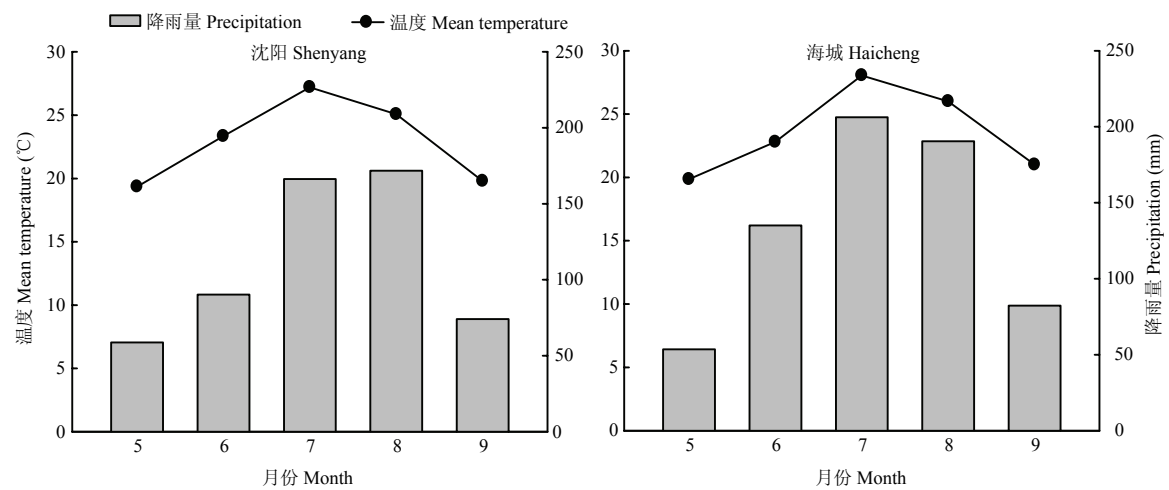


图 1 2017 年 5—9 月试验地点月平均温度和总降雨量情况

Fig. 1 Monthly mean temperatures and total precipitation at the experimental site from April to September in 2017

2 结果

2.1 土壤中树脂包膜肥料的累积释放率和阶段释放率变化

由图 2 可以看出, 供试树脂包膜尿素养分释放特征可以用拟合曲线描述, 氮素释放期为 140 d, 可划分为 3 个阶段, 即缓慢释放阶段、快速释放阶段、降速释放阶段, 其中 0—13 d 养分阶段释放率为 15.27%, 为缓慢释放阶段, 20—65 d, 养分阶段释放率为

42.54%, 为快速释放阶段, 80—120 d 养分阶段释放率为 12.05%, 为降速释放阶段。表明树脂包膜尿素前期和后期养分释放速率较慢, 中期养分释放较快。

2.2 土壤中无机氮的时空变化

无机氮在土壤中含量的高低能在一定程度上反映近期土壤的供氮能力。由图 3 可见, 在 0—20 cm 土层, 不同处理 (除 100%RCU 处理, 即 T0 处理外) 的土壤无机氮含量均显著高于播种前处理, 而 T1、T2、T3 处理与 CK1 处理相比土壤无机氮含量差异不显著。

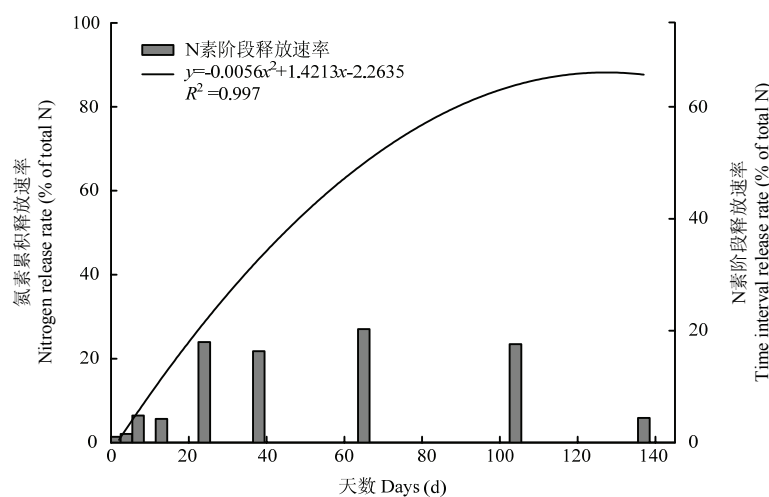


图2 树脂包膜尿素氮素累积释放速率和阶段释放速率

Fig. 2 Nitrogen release rate and stage release rate of RCU

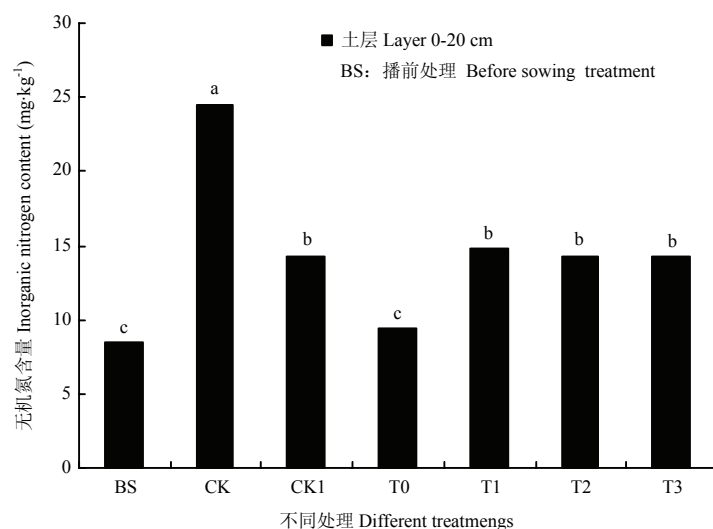


图3 施肥后一周0—20 cm 土层中无机氮的变化

Fig. 3 Changes of inorganic nitrogen in 0-20 cm soil layer during a week of fertilizer application

表明普通尿素在施肥后短时间内能提高土壤无机氮含量；而包膜尿素由于在播种后土壤温度低，氮素释放慢，因此 T0 处理与 BS 处理相比土壤无机氮含量无明显变化。由图 4 可知，苗期 0—20 cm 不同施肥处理土壤无机氮含量表现为 T1>CK>T2>T3>CK1>T0，表明单独施用包膜肥料在玉米生育前期，土壤中可利用无机氮水平较低。随着玉米的吸收、利用及转化，0—20 cm 土层土壤无机氮浓度各施氮处理均呈先增长后下降的趋势，拔节期为峰值时期；20—40 cm 土层一般呈先下降后增长的趋势，乳熟期为峰值时期，分析原

因为在这个时期之前有一次明显降雨过程，导致土壤剖面无机氮随土壤水分向下层移动淋失；60—100 cm 土层各处理土壤无机氮含量无明显变化；成熟期 0—40 cm 土层土壤无机氮残留量表现为包膜肥料各处理一般高于普通尿素处理。表明与普通尿素相比，各时期土壤无机氮含量表层一般以包膜肥料与普通尿素配施处理较高，而其余土层一般以普通尿素较高；在抽雄期之前，特别是拔节期和大喇叭口期处理间差异较大，包膜肥料与普通尿素配施处理较普通尿素处理降低不明显，可见包膜肥的养分释放对玉米的确具

有较好的控释性；包膜肥料与普通尿素配施处理上、中土层无机氮含量一般高于下土层，而普通尿素处理一般以中下土层较高。可见，包膜肥对玉米土壤无机氮向下运移的控制较好，这对减少氮素的潜在淋洗损失是有利的，但是在玉米成熟期，包膜肥料与普通尿

素配施处理中上层无机氮含量明显大于普通尿素处理。

2.3 春玉米氮素阶段累积量及阶段吸收速率特点

由表 2 可知，从玉米整个生育时期对氮素阶段累积量来看，拔节期—大喇叭口期、抽雄期—乳熟期是春玉米对氮素吸收累积量较大的两个阶段，分别占总

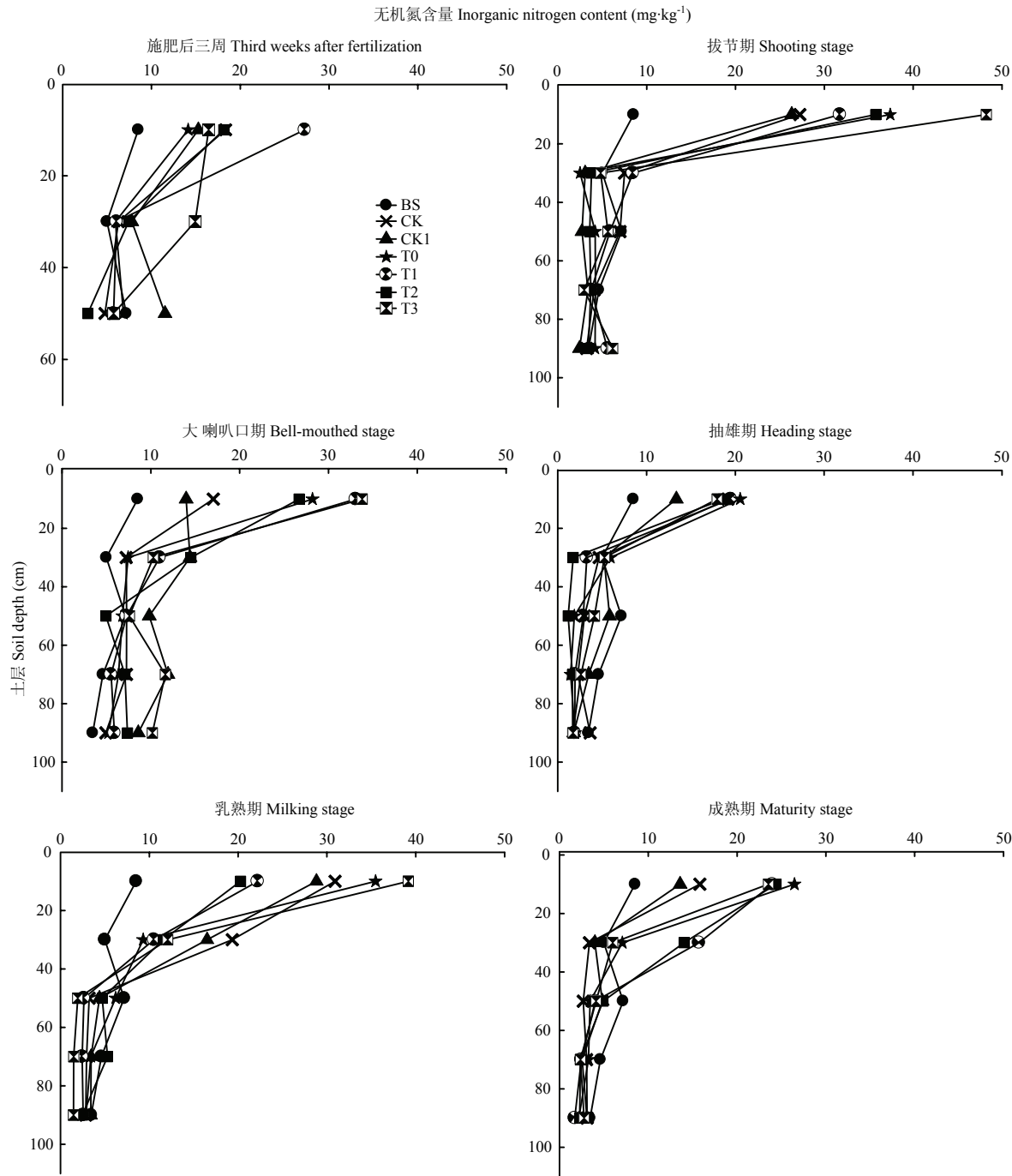


图 4 玉米各生育时期 0—100 cm 土层中无机氮的变化

Fig. 4 Changes of inorganic nitrogen in 0–100 cm soil layer at different growth stages of maize

表 2 春玉米植株氮素阶段累积量

Table 2 Accumulation rate of spring maize plant N to different growth stage

吸收特点	处理	苗期—拔节期	拔节期—大喇叭口期	大喇叭口期—抽雄期	抽雄期—乳熟期	乳熟期—成熟期	合计
Absorption characteristics	Treatment	SD-SS	SS-BS	BS-HS	HS-FS	FS-MS	Total
阶段吸收量	CK0	0.74±0.05a	1.21±0.08ab	0.40±0.17b	0.22±0.10a	0.37±0.11b	2.94b
N accumulation (g/plant)	CK	0.77±0.04a	1.29±0.12a	0.37±0.16a	0.64±0.05b	0.59±0.11ab	3.92a
	CK1	0.84±0.03a	1.07±0.11abc	0.61±0.16a	0.52±0.06b	0.87±0.19a	3.90a
	T0	0.83±0.03a	1.06±0.06abc	0.44±0.03a	0.91±0.13a	0.67±0.10a	3.90a
	T1	0.76±0.04a	0.91±0.10c	0.59±0.05a	1.14±0.26a	0.55±0.21ab	3.95a
	T2	0.74±0.02a	0.98±0.05bc	0.58±0.13a	1.03±0.15a	0.80±0.26ab	4.13a
	T3	0.77±0.02a	1.07±0.03abc	0.28±0.05a	1.15±0.10a	0.68±0.12a	3.94a
占总量比例 N percentage (%)	CK0	25.1	41.6	13.4	7.5	12.5	100
	CK	19.4	32.5	9.5	16.4	14.9	100
	CK1	21.8	27.5	15.9	13.3	22.2	100
	T0	20.8	26.7	11.1	23.3	17.2	100
	T1	18.8	22.6	14.7	28.9	13.9	100
	T2	18.4	24.2	14.3	25.0	19.3	100
	T3	19.3	26.7	6.9	29.1	17.2	100

SD: 苗期; SS: 拔节期; BS: 大喇叭口期; HS: 抽雄期; FS: 乳熟期; MS: 成熟期。图 5 同
SD: Seeding stage; SS: Shooting stage; BS: Bell-mouthed stage; HS: Heading stage; FS: Filling stage; MS: Maturity stage. The same as Fig.5

量的 22%—32%和 20%—29%。由图 5 可见，各处理的植株氮素增加速率变化较为一致，从玉米整个生育期对养分的吸收速率变化看，拔节期-大喇叭口期氮的吸收速率最大，其次是抽雄期-乳熟期。表明，春玉米拔节期至大喇叭口期是营养生长的氮素吸收关键期，抽雄吐丝期至乳熟期是生殖生长的氮素吸收关键

期，这两个时期氮素吸收速率大，积累量高，生产实践中应着重考虑对该时期氮素养分的供应。由表 2 中抽雄吐丝期-乳熟期玉米氮素吸收量可知，包膜肥料各处理与 CK 和 CK1 相比玉米氮素吸收量差异显著，增加吸氮量幅度为 0.39—0.629 g/株，表明包膜肥料可以为玉米后期氮素养分吸收提供氮源。

2.4 包膜尿素减氮配施对产量、氮素利用效率和经济效益的影响

由表 3、4 可知，供试玉米产量两地均表现为 T2>CK>T3>T1>T0>CK1>CK0，施氮肥处理与 CK0 不施氮肥处理相比玉米产量差异显著，表明施用氮肥对春玉米效果显著；施氮肥量相同处理间，包膜肥料 T0、T1、T2 和 T3 处理与等氮量普通尿素处理产量差异显著，在沈阳试验区分别增产为 3.89%、6.5%、10.12%和 8.19%，在海城试验区分别增产 7.58%、14.39%和 25.76%，表明施用包膜肥料可以显著提高春玉米产量；T1、T2 和 T3 处理与 CK 处理，产量间差异不显著，表明包膜肥料与普通尿素搭配较 CK 处理减氮 10%施用可以在不减产的基础上，减少肥料投入，降低生产成本；T1、T2 和 T3 处理比 T0 处理增产、增收幅度分别为 243—581 kg 和 529—1 198 元/hm²（沈阳试验区）；675—1 800 kg 和 1 266—3 216 元/hm²（海城试验区）；表明包膜尿素与普通尿素配合施用

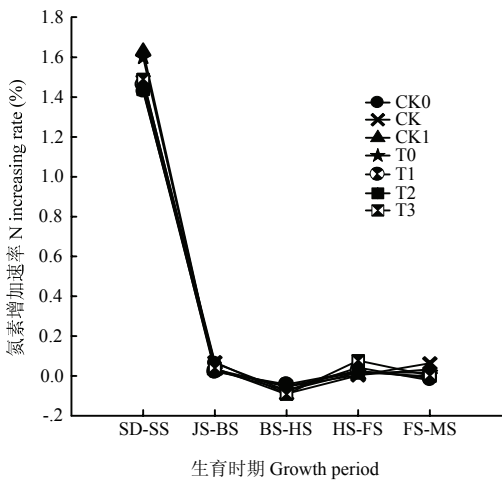


图 5 春玉米植株氮素阶段吸收速率
Fig. 5 Plant N uptake rate of spring maize during different growth stages

可以实现肥料间肥效的缓急相济，优势互补，达到提高产量的目的。其中 T2 处理作为氮源施用效果最好。表 3 还表明，包膜肥料各处理的氮肥利用率和氮肥农学效益均显著高于等氮量普通尿素（CK1）处理，随着包膜肥料与普通尿素配比增加，氮素表观利用率、氮肥农学效益均呈先升高后降低趋势，当 60%包膜尿素搭配 40%普通尿素施用，氮素表观利用率、氮肥农学效益最高，分别为 37.4%和 9.5 kg·kg⁻¹（沈阳试验区），36.3%和 26.4 kg·kg⁻¹（海城试验区），其次是 T3 处理，CK、CK1 处理最低，表明包膜尿素搭配普通尿素施用可以提高氮素表观利用率和氮肥农学效率。

表 3 不同氮肥处理对春玉米产量和氮素利用效率的影响
Table 3 Effect of different fertilizer treatments on yield and N fertilizer use efficiency of spring maize

试验地点 Experimental sites	处理 Treatment	产量 Yield (kg·hm ⁻²)	增产率 Increased rate (%)		氮素表观利用率 REN (%)	氮肥农学效率 NAE (kg·kg ⁻¹)
			比 CK 增产 Compared to CK	比 CK1 增产 Compared to CK1		
沈阳	CK0	6855d	---	---	---	---
Shenyang	CK	10042ab	---	7.9	31.6e	7.7 abc
	CK1	9307c	-7.32	---	31.2f	5.2 d
	T0	9669abc	-3.72	3.89	32.5d	6.9 bcd
	T1	9912ab	-1.29	6.5	35.8b	7.7 abc
	T2	10250a	2.06	10.12	37.4a	9.5 a
	T3	10068ab	0.27	8.19	33.6c	8.7 ab
海城	CK0	7300e	---	---	---	---
Haicheng	CK	11850d	---	19.70	29.1e	21.0b
	CK1	9900d	-16.46	---	30.3d	13.3d
	T0	10650c	-10.13	7.58	31.4c	17.2c
	T1	11325b	-4.43	14.39	34.5b	20.6b
	T2	12450a	5.06	25.76	36.3a	26.4a

表 4 经济效益
Table 4 Economic benefits

试验地点 Experimental site	处理 Treatment	产量 Yield (kg·hm ⁻²)	产值 Output value (yuan)	肥料 Fertilizer input (yuan)	人工 Manual input (yuan)	总成本 Total cost (yuan)	净收入 Net income (yuan)
沈阳	CK0	6855	10439	1371	2250	3620	6819
Shenyang	CK	10042	15264	2432	2850	4681	10583
	CK1	9307	14146	2327	2250	4577	9569
	T0	9669	14696	3120	2250	5370	9326
	T1	9912	15066	2961	2250	5211	9855
	T2	10250	15577	2803	2250	5053	10524
	T3	10068	15305	2644	2250	4894	10411
海城	CK0	7300	11096	1031	2250	3281	7815
Haicheng	CK	11850	18012	1974	2250	4224	13788
	CK1	9900	15048	1879	2250	4129	10919
	T0	10650	16188	2656	2250	4906	11282
	T1	11325	17214	2416	2250	4666	12548
	T2	12450	18924	2176	2250	4426	14498

尿素 Urea 2.00 yuan/kg，树脂包膜尿素 Resin coated urea 3.5 yuan/kg，磷肥 Phosphate fertilizer 1.0 yuan/kg，钾肥 Potassium fertilizer 3.75 yuan/kg，人工费 Manual input 100 yuan per person per day，玉米（14%标准水）Maize 1.52 yuan/kg；（价位依据当年市场价 Price is based on current market price）

2.5 包膜尿素与普通尿素最佳配比

由图 6 可知,根据两种肥料不同时期的释放特点,通过拟合曲线,在辽中南地区,当 62%包膜尿素(RCU)搭配 38%普通尿素(U)条件下,产量、氮肥利用率达到最高且最合理,分别为 10 106 kg·hm⁻²和氮肥利用率为 35.5%;当 61.5%RCU 搭配

38.5%U 条件下,经济效益达到最高且便于推广应用,为 10 585 元/hm²。综上所述,在包膜尿素与普通尿素配施比例为 62%:38%条件下,可以充分发挥普通尿素和包膜肥料优势,可有效增加春玉米中后期土壤无机氮供应能力,进而提高氮肥利用率,获得显著的增产效果,增加经济效益。

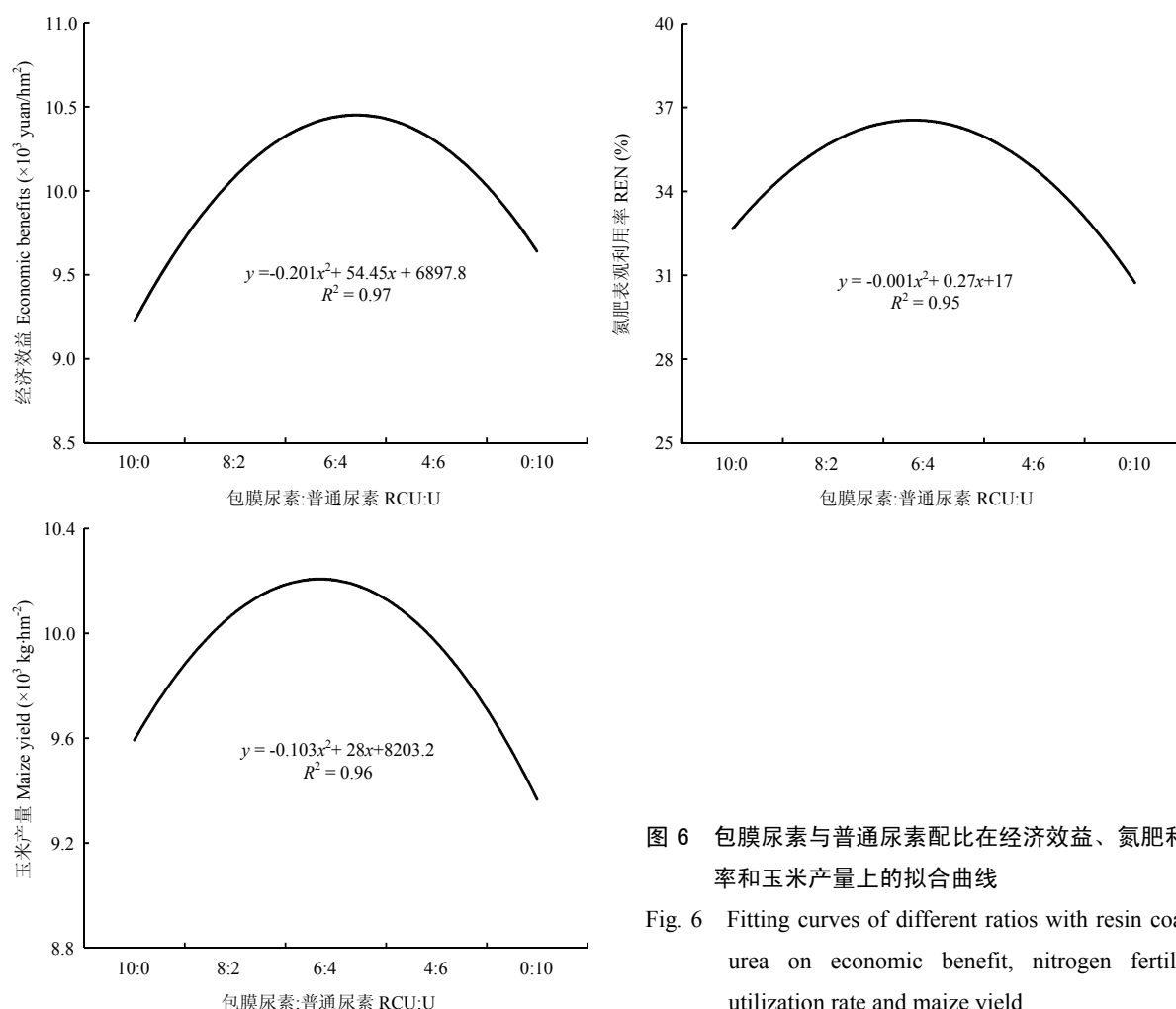


图 6 包膜尿素与普通尿素配比在经济效益、氮肥利用率和玉米产量上的拟合曲线

Fig. 6 Fitting curves of different ratios with resin coated urea on economic benefit, nitrogen fertilizer utilization rate and maize yield

3 讨论

3.1 包膜尿素不同配比减施对土壤中速效氮供应和氮肥利用效率的影响

土壤中无机氮含量能够表征土壤中可利用氮水平的高低^[18],是土壤肥力的重要指标和作物生长的重要氮源^[19],玉米在整个生育期内生长速度快且生物量大,物质形成和累积速率高,对氮素养分吸收强度大^[20]。陈剑秋等^[17]研究表明供试树脂包膜尿素养分释放特征类似幂乘函数曲线,曲线近似“S”状。本研

究与之相吻合。王端等^[21]研究表明包膜肥料在玉米整个生育时期,能不断的给玉米提供充足的氮素养分,使土壤无机氮含量始终维持在较高水平;但佟玉欣等^[9]研究结果表明控释肥养分释放较慢,基施控释肥易造成玉米前期短时脱肥。本研究表明在施肥后第一周,T0 处理土壤无机氮含量与施肥前相比无明显变化;苗期 T0 处理同添加普通尿素处理相比,土壤无机氮含量最低;根据 2017 年 5 月气象数据显示试验区气温为 18℃,土壤温度为 12℃,月总降雨量为 33.2 mm,基本与辽宁地区近 30 年 5 月份气象数据相吻合^[15-16]。

FUJISAWA 等^[12]和张玉玲等^[13]研究结果表明控释肥的释放速率,在土壤 10—25℃内,每升高 5℃,释放速率常数一般提高 1 倍,说明在辽中南地区包膜尿素前期释放受到土壤温度和降雨量的影响。而张敬昇等^[24]研究表明控释尿素和普通尿素配合施用既能弥补控释尿素前期释放速率过慢的不足,又能通过控释氮肥延长在玉米营养生长和生殖生长两个关键时期的氮素供应。本研究结果与之相似,在施肥后第一周和苗期,T1、T2 和 T3 处理与施肥前相比土壤无机氮含量有显著增加。随着玉米的吸收、利用及转化,土壤无机氮浓度(0—20 cm)各施氮处理随生育期推进均呈先增长后下降的趋势,拔节期为峰值时期;20—40 cm 一般呈先下降后增长的趋势,乳熟期为峰值时期;玉米的氮素吸收累积量从拔节期开始大幅提高,并在抽雄期至乳熟期达到高峰^[22],拔节初期和抽雄期是氮营养关键时期,吸收速率大,养分积累量高^[23],本研究结果与之相似。说明本试验两种肥料不同时期的释放衔接与玉米对氮素的需求基本吻合。ZHENG 等^[25]研究表明在成熟期 0—40 cm 土层各控释肥处理土壤无机氮含量高于常规尿素处理,与施用普通尿素处理相比,能显著减少土壤无机氮向深层淋洗损失;控释肥对玉米土壤无机氮向下运移的控制较好,这对减少氮素的潜在淋洗损失是有利的,但是在玉米成熟期,控释肥处理中上层土壤无机氮含量明显的大于普通化肥处理,玉米后期氮素过量供应容易造成玉米贪青晚熟^[26]。本研究结果与之相吻合。说明本试验两种肥料不同时期的释放衔接与玉米对氮素的需求还没有完全吻合,需进一步研究改进氮素控制释放的时期和释放量,仍是值得深入研究的一个问题。

由于土壤会固定一部分肥料养分,因此当季肥料表观利用率并不能很好地反映肥料真实利用效率^[27]。当前能反映作物对氮肥的吸收、利用效果的有效指标有氮肥农学效率、氮肥利用率^[28]。王寅等^[29]研究表明控释尿素与普通尿素配比施用可提高氮肥利用率。施用控释尿素可以显著提高水稻、玉米、小麦等作物的氮肥利用率和氮肥农学效率^[30-31]。本研究结果也表明,控释尿素与普通尿素配施处理的氮肥农学效率和氮肥吸收利用率均显著高于普通尿素处理,且随着控释尿素与普通尿素配比增加,氮肥利用率、氮肥农学效益均呈先升高后降低趋势。当 RCU 和 U 比例为 6 : 4 施用,氮肥利用率、氮肥农学效益最高,分别为 37.4%和 9.5 kg·kg⁻¹ (沈阳试验区), 36.3%和 26.4 kg·kg⁻¹ (海城试验区)。

3.2 包膜尿素减氮配施对玉米产量和经济效益的影响

2014 年全国农业工作会议明确提出了“化肥减施增效”任务指标,试图通过降低化肥用量,提高肥料利用效率,从而促进农业可持续发展。研究表明,采用控释肥作为氮素缓释肥料,在小麦、水稻、春玉米、土豆、棉花等作物上,均能在稳产,甚至增产情况下实现化肥减量施肥^[20,32];在等氮条件下控释尿素和普通尿素配合施用处理能增加产量及提高产量构成因子^[24]。本研究结果表明,在等氮条件下,包膜尿素与普通尿素配合施用处理的产量显著高于普通尿素处理,且随着控释肥与普通尿素比例增加均呈先升高后降低趋势^[30]。然而,随着控释肥与普通尿素施用比例增加,施肥成本必然随着提高,影响经济效益。控释尿素和普通尿素配合施用各处理比等氮量普通尿素处理增产、增收幅度分别为 3.89%—10.12%和 243—955 元/hm² (沈阳试验区); 7.58%—25.76%和 363—3 579 元/hm² (海城试验区);在减氮 10%条件下,控释尿素和普通尿素配合施用与 (100%U) CK 处理相比玉米产量差异不显著,优势是可以在不减产的基础上,减少肥料投入,降低生产成本,便于在大田作物上大面积推广应用,其中 T2 处理表现最好;郭萍等^[33]研究表明控释尿素和普通尿素配合施用,通过两种肥料不同时期的释放衔接来提高玉米产量。本研究 T1、T2 和 T3 处理比 T0 处理增产、增收幅度分别为 243—581 kg 和 529—1 198 元/hm² (沈阳试验区); 675—1 800 kg 和 1266—3 216 元/hm² (海城试验区);其中所有处理中均已 T2 处理 RCU 搭配 U 比例为 6 : 4 施用,产量和经济效益最高,分别为 10 250 kg·hm⁻² 和 10 524 元/hm² (沈阳试验区); 12 450 kg·hm⁻² 和 14 498 元/hm² (海城试验区)。通过拟合曲线,在辽中南地区,当 62%RCU 搭配 38%U 条件下,产量和经济效益最高为 10 106 kg·hm⁻² 和 10 585 元/hm²。

3.3 树脂包膜尿素与普通尿素配施比例

李伟等^[30]研究了释放期为 60 d 包膜尿素与普通尿素配施,结果表明随着控释比例的增加,夏玉米产量呈现先升高后降低的趋势,当掺混比例为 50%时,增产效果最好。衣文平等^[14]研究了释放期为 30、60 和 90 d 包膜尿素与普通尿素配施,结果表明释放期为 60 d 包膜尿素与普通尿素配施,当掺混比例为 30%时,夏玉米产量、氮素积累总量、氮素表观利用率和经济效益最高。郭萍^[33]等研究了释放期为 60—90 d 包膜尿素与普通尿素配施,结果表明随着控释肥比例的增加,

夏玉米产量呈现先升高后降低的趋势,当掺混比例为50%—75%时,既能增加夏玉米产量,又可实现氮素的高效利用。而辽中南地区春玉米全生育期日数,变化范围为126—181 d^[34]。黄淮海夏玉米区全生育期日数,变化范围为95—115 d^[35]。因此,本研究结果表明随着控释肥比例的增加,春玉米产量、氮素表观利用率和经济效益均呈现先升高后降低的趋势,当掺混比例为62%时,春玉米产量、氮素表观利用率和经济效益最高,分别为10 106 kg·hm⁻²、35.5%和10 585元/hm²。说明与黄淮海区相比辽中南地区可适当提高包膜尿素与普通尿素掺混比例,通过两种肥料不同时期的释放衔接,可以满足春玉米全生育期对氮素的需求,获得显著的增产效果,提高经济效益。

4 结论

包膜尿素与普通尿素配合施用,通过两种肥料不同时期的释放衔接,可以实现肥料间肥效的缓急相济,优势互补,达到平衡供肥的目的,包膜尿素不同配比籽粒产量较普通尿素处理增产幅度3.89%—25.76%。肥料间肥效的有效接力对产量建成作用均衡,显著促进土壤前期供氮能力和玉米抽雄吐丝后期氮素积累,使氮素利用率和农学效率分别提高2.4%—6.2%和2.5%—7.3%。通过拟合曲线,当62%包膜尿素搭配38%普通尿素条件下,产量、氮素表观利用率和经济效益最高且最合理,可以充分发挥普通尿素和缓释肥优势,简化生产过程,促进氮肥高效生产利用,是克服树脂包膜类控释肥成本较高的一种较经济实用的新型施肥方法。在本试验条件下,包膜尿素与普通尿素配合施用的最佳比例为6:4。

References

- [1] 韩蔚娟. 新型肥料在黑土上的施用效果及环境效应研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2015.
HAN W J. Study on the application effectiveness and environmental effect of new-type fertilizer in the black soil[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [2] 孙许, 张吉旺, 靳立斌. 玉米高产与氮肥高效协同实现存在的问题及其途径. 玉米科学, 2014(1): 143-148.
SUN X, ZHANG J W, JIN L B. Problems and approaches of achieving high yield and high nitrogen use efficiency in maize production. *Maize Science*, 2014(1): 143-148. (in Chinese)
- [3] 樊小林, 廖宗文. 控释肥料与平衡施肥和提高肥料利用率. 植物营养与肥料学报, 1998(3): 219-223.
FAN X L, LIAO Z W. Controlled release fertilizers and balanced fertilization and increase of fertilizer use efficiency. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1998(3): 219-223. (in Chinese)
- [4] 喻醴之. 西南玉米几种新型肥料一次性施用效果的研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2013.
YU X Z. Effect of single basal application of several new type fertilizers on maize in Southwestern China[D]. Yaan: Sichuan Agriculture University, 2013. (in Chinese)
- [5] 杨红竹, 郑国亮, 刘海林, 林清火, 罗微. 缓/控释肥料类型及质量评价方法. 热带农业科学, 2016(5): 21-27.
YANG H Z, ZHENG G L, LIU H L, LIN Q H, LUO W. Types of slow/controlled release fertilizer and its quality evaluation method. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2016(5): 21-27. (in Chinese)
- [6] SHOJI S, KANNO H. Use of polyolefin-coated fertilizers for increasing fertilizer efficiency and reducing nitrate leaching and nitrous oxide emissions. *Fertilizer Research*, 1994, 39(2): 147-152.
- [7] 翟军海, 高亚军, 周建斌. 控释/缓释肥料研究概述. 干旱地区农业研究, 2002(1): 45-48.
ZHAI J H, GAO Y J, ZHOU J B. Summary of controlled release / slow release fertilizers. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2002(1): 45-48. (in Chinese)
- [8] 孙磊. 控释氮肥在水稻上的应用效果研究. 作物杂志, 2009(10): 1001-7283.
SUN L. Effects of application of controlled releasing urea on rice. *Crop*, 2009(10): 1001-7283. (in Chinese)
- [9] 佟玉欣, 李玉影, 刘双全, 姬景红, 王伟, 郑雨. 黑龙江春玉米籽粒产量与氮素吸收变化特征. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(5): 1094-1102.
TONG Y X, LI Y Y, LIU S Q, JI J H, WANG W, ZHENG Y. Variations of the grain yields and N absorption of spring maize in Heilongjiang Province. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(5): 1094-1102. (in Chinese)
- [10] 司贤宗, 韩燕来, 王宜伦, 刘蒙蒙, 谭金芳. 缓释氮肥与普通尿素配施提高冬小麦-夏玉米施肥效果的研究. 中国农业科学, 2013, 46(7): 1390-1398.
SI X Z, HAN Y L, WANG Y L, LIU M M, TAN J F. Improving nitrogen use efficiency by combined use of slow release nitrogen fertilizer with urea for high yielding winter wheat-summer maize rotation system. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(7): 1390-1398. (in Chinese)
- [11] 黄巧义, 唐拴虎, 张发宝, 张木, 黄旭, 逢玉万, 李苹, 付弘婷. 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. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(3): 622-631.

- HANG Q Y, TANG S H, ZHANG F B, ZHANG M, HUANG X, PANG Y W, LI P, FU H T. Nitrogen release and dynamic of controlled release fertilizer studied with rice. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(3): 622-631. (in Chinese)
- [12] FUJISAWA E, KOBAYASHI A, TOMOJI. A mechanism of nutrient release from resin-coated fertilizers and its estimation by kinetic methods, 5: Effect of soil moisture level on release rates from resin-coated mixed fertilizer. *Japanese Journal of Soil Science & Plant Nutrition*, 1998, 69(6): 555-660.
- [13] 张玉玲, 张玉龙, 党秀丽, 虞娜, 阎本昌. 包膜尿素氮素的溶出特性研究. *中国农业科学*, 2008, 41(5): 1383-1389.
- ZHANG Y L, ZHANG Y L, DANG X L, YU N, Masahiro Okamoto. Study of the characteristics of nitrogen solubility from coated urea. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(5): 1383-1389. (in Chinese)
- [14] 衣文平, 史桂芳, 武良, 李亚星, 谷佳林, 朱国梁, 许俊香, 徐秋明. 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. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(4): 931-937.
- YI W P, SHI G F, WU L, LI Y X, GU J L, ZHU G L, XU J X, XU Q M. Applications of polymer coated urea with different release time and conventional urea on summer maize growth. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2010, 16(4): 931-937. (in Chinese)
- [15] 杨文艳, 迟春艳. 辽宁省四季降水时空变化特征分析. *安徽农业科学*, 2008, 36(21): 9197-9199, 9209
- YANG W Y, CHI C Y. Analysis on characteristics of temporal and spatial changes for seasonal precipitation in Liaoning province. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2008, 36(21): 9197-9199, 9209. (in Chinese)
- [16] 纪然. 1960-2016 年辽宁省地表温度时空变化特征及影响因素分析[D]. 沈阳: 辽宁师范大学, 2018.
- JI R. Temporal and spatial variation of surface temperature and influencing factors analysis in Liaoning province from 1960 to 2016[D]. Shenyang: Liaoning Normal University, 2018. (in Chinese)
- [17] 陈剑秋. 几种新型缓控释肥工艺及养分释放特征研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2012.
- CHEN J Q. Study on Technology and Nutrient release characteristics of new slow/controlled release fertilize[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- [18] 冯爱青, 张民, 李成亮, 杨越超. 控释氮肥对土壤酶活性与土壤养分利用的影响. *水土保持学报*, 2014(3): 177-184.
- FENG A Q, ZHANG M, LI C L, YANG Y C. Effects of controlled release nitrogen fertilizer on soil enzyme activities and soil nutrient utilization. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014(3): 177-184. (in Chinese)
- [19] 徐晓楠, 陈坤, 冯小杰, 彭靖, 潘全良, 王月, 李娜, 韩晓日, 战秀梅. 生物炭提高花生干物质与养分利用的优势研究. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(2): 444-453.
- XU X N, CHEN K, FENG X J, PENG J, PAN Q L, WANG Y, LI N, HAN X R, ZHAN X M. Preponderant effect of biochar application in peanut dry matter accumulation and fertilizer nutrient use efficiency. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2018, 24(2): 444-453. (in Chinese)
- [20] 鲁艳红, 聂军, 廖育林, 周兴, 谢坚, 汤文光, 杨曾平. 不同控释氮肥减量施用对双季水稻产量和氮素利用的影响. *水土保持学报*, 2016(2): 155-161.
- LU Y H, NIE J, LIAO Y L, ZHOU X, XIE J, TANG W G, YANG Z P. Effects of application reduction of controlled release nitrogen fertilizer on yield of double cropping rice and nitrogen nutrient uptake. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016(2): 155-161. (in Chinese)
- [21] 王端. 包膜尿素氮素释放特征及在春玉米上的应用效果[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015.
- WANG D. Characteristics of nitrogen release and effect of coated urea on spring maize[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [22] 林电, 王强, 叶顶强, 赵回丞. 超甜玉米营养元素规律研究. *中国农学通报*, 2006(10): 426-430.
- LIN D, WANG Q, YE D Q, ZHAO H C. Studies on nutrient characters of super sweet corn. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006(10): 426-430. (in Chinese)
- [23] 陈建生, 徐培智, 唐拴虎, 张发宝, 解开治, 黄旭. 施肥对甜玉米物质形成累积特征影响研究. *植物营养与肥料学报*, 2010(1): 58-64.
- CHEN J S, XU P Z, TANG S H, ZHANG F B, XIE K Z, HUANG X. Effects of fertilization on cumulating characteristics of dried matter mass of sweet corn. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010(1): 58-64. (in Chinese)
- [24] 张敬昇, 李冰, 王昌全, 向毫, 周杨洪, 尹斌, 梁靖越, 付月君. 控释氮肥与尿素掺混比例对作物中后期土壤供氮能力和稻麦产量的影响. *植物营养与肥料学报*, 2017(1): 110-118.
- ZHANG J S, LI B, WANG C Q, XIAN H, ZHOU Y H, YIN B, LIANG J Y, FU Y J. Effects of the blending ratio of controlled release nitrogen fertilizer and urea on soil nitrogen supply in the mid-late growing stage and yield of wheat and rice. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017(1): 110-118. (in Chinese)
- [25] ZHENG W, ZHANG M, LIU Z. Combining controlled-release urea and normal urea to improve the nitrogen use efficiency and yield under wheat-maize double cropping system. *Field Crops Research*,

- 2016, 197: 52-62.
- [26] 王坤. 控释肥对小麦—玉米产量及养分吸收的影响[D]. 南京: 南京林业大学, 2010.
- WANG K. Effect of controlled release fertilizer on the yield and nutrient accumulation in the wheat-maize rotation system[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2010. (in Chinese)
- [27] 宋海星, 李生秀. 玉米生长量、养分吸收量及氮肥利用率的动态变化. 中国农业科学, 2003, 36(1): 71-76.
- SONG H X, LI S X. Dynamics of nutrient accumulation in maize plants under different water and N supply conditions. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(1): 71-76. (in Chinese)
- [28] 王宜伦, 李潮海, 谭金芳, 韩燕来, 张许. 超高产夏玉米植株氮素积累特征及一次性施肥效果研究. 中国农业科学, 2010, 43(15): 3151-3158.
- WANG Y L, LI C H, TANG J F, HAN Y L, ZHANG X. Studies on plant nitrogen accumulation characteristics and the effect of single application of base fertilizer on Super-High-Yield summer maize. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(15): 3151-3158. (in Chinese)
- [29] 王寅, 冯国忠, 张天山, 茹铁军, 袁勇, 高强. 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. 中国农业科学, 2016, 49(3): 518-528.
- WANG Y, FENG G Z, ZHANG T S, RU T J, YUAN Y, GAO Q. 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. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(3): 518-528. (in Chinese)
- [30] 李伟, 李絮花, 唐慎欣, 李海燕, 刘旭凤, 彭强. 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. 作物学报, 2012(4): 699-706.
- LI W, LI X H, TANG S X, LI H Y, LIU X F, PENG Q. Effects of different mixing rates of Controlled-Release urea and common urea on grain yield and nitrogen use efficiency of summer maize. *Acta Agronomica Sinica*, 2012(4): 699-706. (in Chinese)
- [31] 刘飞, 张民, 诸葛玉平, 李倩, 刘东雪, 王建. 马铃薯玉米套作下控释肥对土壤养分垂直分布及养分利用率的影响. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(6): 1351-1358.
- LIU F, ZHANG M, ZHUGE Y P, LI Q, LIU D X, WANG J. Effects of controlled-release fertilizer on vertical distribution of soil nutrient use efficiencies under potato and maize relay cropping system. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2011, 17(6): 1351-1358. (in Chinese)
- [32] TIMILSENA Y P, ADHIKARI R, CASEY P. Enhanced efficiency fertilizers: a review of formulation and nutrient release patterns. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 2015, 95(6): 1131-1142.
- [33] 郭萍, 朱从桦, 查丽, 谢孟林, 王良俊, 袁继超, 孔凡磊. 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. 中国土壤与肥料, 2016(6): 99-105.
- GUO P, ZHU C H, ZHA L, XIE M L, WANG L J, YUAN J C, KONG F L. Effects of the combined application of slow-release urea and urea on activities of key enzymes related to nitrogen metabolism and nitrogen utilization of maize. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2016(6): 99-105. (in Chinese)
- [34] 淮贺举, 李存军, 李奇峰, 史磊刚, 陶欢, 胡海棠, 陈阜. 东北地区春玉米物候期时空动态变化特征. 玉米科学, 2019, 27(1): 81-86.
- HUAI H J, LI C J, LI Q F, SHI L G, TAO H, HU H T, CHEN F. Changes of spring maize phenology from 1981 to 2012 in the Northeast Plain of China. *Journal of Maize Sciences*, 2019, 27(1): 81-86. (in Chinese)
- [35] 杨岩, 谭德水, 江丽华, 郭建华, 孙克刚, 徐钰, 石璟, 王梅, 刘兆辉. 黄淮海夏玉米一次性施肥技术效应研究. 中国农业科学, 2018, 51(20): 3909-3919.
- YANG Y, TAN D S, JIANG L H, GUO J H, SUN K G, XU Y, SHI J, WANG M, LIU Z H. The effects of one-off fertilization of summer maize in Huang-Huai-Hai Region. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(20): 3909-3919. (in Chinese)

(责任编辑 李云霞)