

缓控释肥一次性施用后土壤氮素 供应与损失特征研究

杨俊刚^{1,2}, 安文博^{1,3}, 连炳瑞^{1,3}, 邹国元^{1,2}, 王激清^{2,3}, 孙焱鑫^{1,2}

(1. 北京市农林科学院植物营养与资源研究所, 北京 100097; 2. 北京市缓控释肥料工程技术研究中心, 北京 100097;

3. 河北北方学院农林科技学院, 河北 张家口 075000)

摘要: 采用小区试验, 设置常规施肥(U, 240 kg/hm²)、包膜控释肥料(CU, 180 kg/hm²)、双效抑制剂增效肥料(DU, 180 kg/hm²)、添加生物炭保护层的抑制剂增效肥料(BU, 180 kg/hm²)一次性施肥、无氮对照(CK)5个处理, 研究对夏玉米生长、产量、氮挥发和土壤无机氮残留的影响。结果表明, 一次性施肥显著增加了苗期无机氮的供应, 在大喇叭口期维持一定的供氮强度, 其中BU处理供氮较高。与常规施肥处理相比, 一次性减量施肥对营养生长的影响不明显, 产量未出现下降, 氮肥农学效率显著增加, 氮挥发降低54%~63%, 硝态氮残留减少6%~20%。3种缓控释肥减量一次性施用均可维持较高的产量并降低环境影响。与聚合物包膜控释肥相比, 双效抑制剂增效肥制作简单、成本低, 氮素释放快、供应充足, 添加生物炭保护层可以进一步促进增产增效。

关键词: 夏玉米; 包膜尿素; 增效尿素; 氮挥发; 氮素残留

中图分类号: S513.062

文献标识码: A

Characteristics of Soil Nitrogen Supply and Losses after a One-Off Application of Slow and Controlled Release Fertilizer

YANG Jun-gang^{1,2}, AN Wen-bo^{1,3}, LIAN Bing-rui^{1,3}, ZOU Guo-yuan^{1,2}, WANG Ji-qing^{2,3}, SUN Yan-xin^{1,2}

(1. Institute of Plant Nutrition and Resources, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097;

2. Beijing Engineering Technology Research Center for Slow, Controlled-release Fertilizer, Beijing 100097;

3. College of Agriculture and Forestry, Hebei North University, Zhangjiakou 075000, China)

Abstract: A field experiment was conducted with 5 treatments, (1) control(CK): no N fertilizer; (2) conventional fertilization(U): traditional urea at 240 kg/ha by two splits; (3) synergistic urea(DU): double-effect inhibitor synergistic urea mixed with traditional urea = 2:1, one-off fertilization at 180 kg/ha; (4) coated urea(CU): resin-coated urea mixed with traditional urea = 1:2, one-off application at 180 kg/ha; (5) biochar synergistic urea(BU): biochar synergistic urea and traditional urea mixed at 2:1, one-off fertilization at 180 kg/ha, to verify the trait of nitrogen(N) supply, yield and environmental impacts. Three one-off fertilization treatments significantly increased mineral N supply in the early stage, and maintained a certain N supply intensity in the big bell stage; the N supply of the BU treatment was higher than the other two treatments. Compared with U treatment, one-off fertilization did not produce obvious effects on maize growth and yield, and the agronomic N efficiency increased significantly, the NH₃ emission decreased by 54%–63% and soil nitrate N residues also decreased by 6%–29%. In Conclusion, one-off application of the controlledow release fertilizers by 25% reduction can sustain a high-level yield and reduce environmental impacts. In comparison to polymer-coated urea, the manufacture of double effect inhibitor synergistic urea is simpler, lower cost, and the N release is faster, resulting in sufficient supply. The double effect inhibitor synergistic urea added with biochar protective layer can further promote yield and N use efficiency.

Key words: Summer maize; Coated urea; Synergistic urea; Ammonia volatilization; Nitrate residual

录用日期: 2022-01-18

基金项目: 财政部和农业农村部“国家现代农业产业技术体系”(CARS-02)、国家重点研发计划项目(2018YFD0200601)、北京市粮经作物产业创新团队(BAIC09-2019)

作者简介: 杨俊刚(1975-), 副研究员, 主要从事植物营养与新型肥料应用研究工作。E-mail: jungangyang@163.com

邹国元为本文通讯作者。E-mail: gyzhou@163.com

一次性施肥已经成为我国玉米生产中一种常见的施肥方式,缓控释肥料在促进一次性施肥的应用与推广中起到了重要的作用^[1,2]。一次性施肥不仅可以降低施肥次数和劳动强度,而且可以提高玉米、小麦和水稻三大粮食作物的产量和氮肥利用率,并减少淋洗、挥发等氮损失^[3]。一次性施肥中应用较多的缓控释肥料包括聚合物包膜尿素、含氮素抑制剂的缓释肥、硫包衣尿素和部分肥包肥产品,这些肥料主要针对氮肥进行缓控释处理,减少氮肥集中大量施用产生的氮素损失。前人对于缓控释肥释放类型、释放期以及与普通氮素的配比研究做了大量工作。在黄淮海夏玉米区和东北春玉米区做了包膜尿素释放期筛选以及与普通尿素配比比例的研究,推荐了不同区域控释肥的释放天数和适宜的配比,为一次性施肥技术参数细化提供了支持^[4-7]。

包膜尿素是一种比较理想的一次性施肥用肥,由于其受水土等环境条件影响较大以及成本高等问题,在环境适应性、释放期匹配以及低成本肥料替代上还有待进一步研究^[8]。目前的研究中一次性施肥在不同地区或不同气候条件下对氮素释放期的要求尚不明确,有的即使是同一地区所选释放期也不相同,还有一些研究未说明释放期或直接使用普通尿

素^[9,10],对氮素供应动态与作物吸收匹配还缺乏系统的研究。同时,对于一次性施肥的氮素损失和环境效应的研究还不深入。因此有必要对不同种类的缓控释肥料,根据其特性配比不同的普通氮肥,研究其对产量和氮素损失的影响。华北平原是我国夏玉米主产区,但生产中施肥强度高,其氨挥发损失已经成为全球氨排放的“热点区”,资源环境问题逐步凸显^[11]。本文以该区域的夏玉米为对象,开展不同类型缓控释肥一次性施肥的氮素供应特征与产量、环境效应的研究。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2018年6月20日到10月9日在北京市房山区农作物新品种展示基地(115°59'16" E, 39°39'119" N)进行。所在地区年平均气温11.6℃,降水量为687 mm,属温带大陆性气候,玉米试验季平均气温25.8℃,总降雨量312 mm(图1)。供试土壤为壤土,0~30 cm土壤基本理化性质为有机质18.5 g/kg、硝态氮54.4 mg/kg、铵态氮2.46 mg/kg、有效磷38.4 mg/kg、速效钾183 mg/kg, pH值8.2。播前0~30、30~60、60~90 cm土壤容重分别为1.31、1.40、1.47 g/cm³。

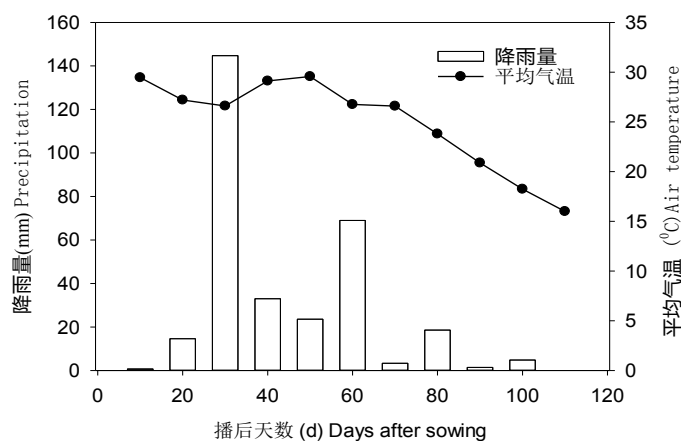


图1 播种后每10 d平均气温和降水量

Fig.1 Temperatures and precipitations at 10 days interval after sowing

1.2 试验设计

试验设5个处理,分别为无氮对照(CK),不施氮肥;习惯施肥(U),普通尿素分次施肥,总施氮量240 kg/hm²,基追比为2:3,大喇叭口期进行追肥(播后第48天),表面撒施尿素后立即喷灌;增效尿素(DU),播前一次性施肥,双效抑制剂增效尿素:普通尿素=2:1,施氮量180 kg/hm²;包膜尿素(CU),一次性施肥,树脂包膜控释尿素:普通尿素=1:2,施氮量180 kg/hm²;含抑制剂生物炭涂层增效尿素(BU),一

次性施肥,双效抑制剂增效尿素(添加生物炭):普通尿素=2:1,施氮量180 kg/hm²。每个处理3次重复,随机排列,小区面积30 m²(6 m×5 m)。各处理磷、钾肥用量均相同,全部作基肥,用量分别为90 kg/hm²、120 kg/hm²。

包膜尿素采用聚烯烃树脂包膜,由北京市缓控释工程中心生产,释放期60 d;双效抑制剂增效尿素由北京市缓控释工程中心研制,将硝化抑制剂DCD和脲酶抑制剂NBPT混合液喷涂在大颗粒尿素上制

成,抑制剂添加比例为含氮量的1.0%;生物炭型抑制剂增效尿素是在上述增效尿素的基础上添加生物炭而成,生物炭添加量为3%。磷、钾肥分别为过磷酸钙和氯化钾。

田间管理:夏玉米品种为当地主栽品种郑单958,行距60 cm,株距25 cm,种植密度6.67万株/hm²。灌水和病虫害防治同当地习惯。

1.3 测定项目与方法

采用通气法收集土壤氮挥发^[12]。氮气的捕获装置由PVC塑料圆管(内径15 cm,高10 cm)制成,内置两块浸泡过磷酸甘油溶液的海绵,海绵厚度为2 cm,直径为16 cm,下层海绵距离底部5 cm,上层与顶部相平。施基肥后开始收集氮气,每个小区随机放2个集气装置。追肥前收起所有装置,撒施追肥灌水后,再随机摆放装置。取样时,取出下层海绵放入封口袋中,并换上另一块经过同样处理的海绵。上层的海绵定期更换,并记录取样的间隔时间。施肥后,连续3 d每天取样1次,之后每2 d取样1次,当测得的氮挥发量较少时,延长取样间隔至7 d,直至基本检测不到氮气为止,停止收集。每次取样后将带回的海绵用凯氏定氮法进行测定。挥发量由下式计算。

田间土壤氮挥发速率[kg/(hm²·h)]=单个装置每次测出的铵态氮含量/(装置横截面积×取样时间间隔)

土壤无机氮(硝态氮、铵态氮)测定:苗期(7月15日,播后第25天)、大喇叭口期(8月9日,播后第50天)和抽雄期(8月23日,播后第64天)取0~30 cm土壤;收获后(10月9日,播后第111天)分3层取0~90 cm土壤,采用分光光度法测定无机氮。在进行小批量测定时样品时,与流动分析法相比,分光光度法也有较高的精准度和精密度,可以满足检测需求^[13],因此本试验中采用紫外分光光度法测定土壤硝态氮,采用分光光度法测定土壤铵态氮^[14]。

生长指标、全氮含量与产量:分别于播后第40 d(苗期)、50、64 d测定株高(直尺)、茎粗(游标卡尺)和叶片叶绿素(SPAD值);分别于播后第40、50、64 d取全部植株,收获(111 d)时取玉米茎叶样品,采用凯氏定氮法测定全氮含量;收获时每个小区取2 m²,计穗数、鲜重,将玉米穗按小区装入网袋风干后考种测定子粒产量、百粒重。

氮肥农学效率=(施氮区产量-对照区产量)/施氮量×100%;

氮肥偏生产力=施氮区产量/施氮量;

氮挥发损失率=(施氮区氮挥发量-对照区氮挥

发量)/施氮量×100%。

1.4 数据处理与分析

采用Microsoft Excel 2016进行数据录入、整理和图表制作,采用SPSS 17.0进行显著性分析($P < 0.05$)。

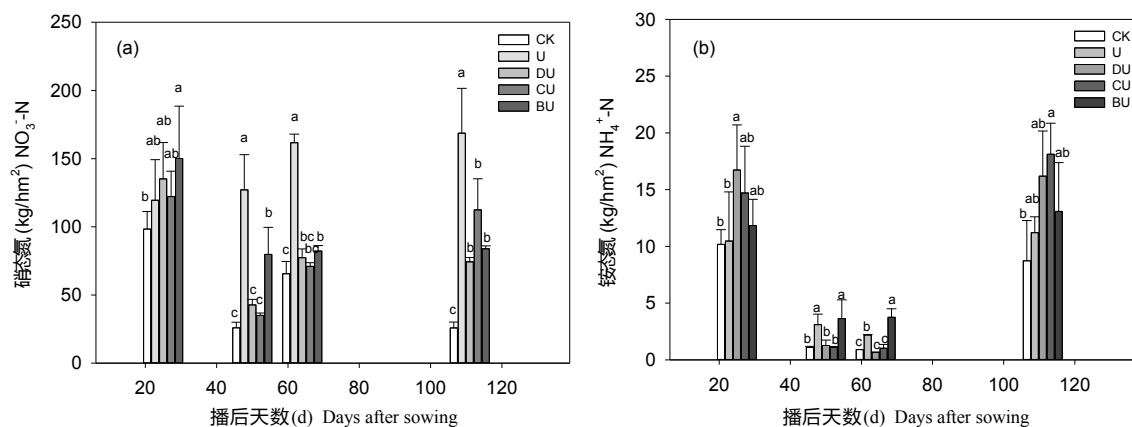
2 结果与分析

2.1 土壤无机氮供应动态变化

不同处理土壤硝态氮和铵态氮在玉米每个生育阶段均出现显著差异(图2)。播种后第25 d,BU处理硝态氮含量最高,DU处理的铵态氮显著高于CK和U处理,增加60%~64%,说明增效尿素一次性施肥在早期对无机氮增加作用明显。3个一次性施肥处理间硝态氮和铵态氮均无显著差异,说明不同类型缓控释肥在增加早期无机氮供应上差别并不明显。U处理大喇叭口期追肥后,无机氮供应量显著增加,其中,硝态氮含量远高于其他处理,此时期BU处理的硝态氮和铵态氮也维持了较高的供应量,在播后第50天显著高于CU和DU处理,说明肥料中添加的氮肥抑制剂产生了作用,在施肥后50 d后能维持较高的供氮浓度。收获后U处理硝态氮残留量仍很高,而3个一次性施肥处理的硝态氮显著低于U处理,且铵硝比明显提高有利于降低硝态氮的累积和向下层的淋洗。总体来看,BU处理无机氮供应与玉米养分需求规律更加匹配,而DU处理在大喇叭口期养分供应相对较低,CU处理与之相似,说明这两个肥料对氮素释放的影响较大,存在进一步调整的空间。

2.2 夏玉米不同时期生长指标与植株全氮含量变化

玉米苗期(播后40 d)、大喇叭口期(播后50 d)、抽雄期(播后64 d)各处理除苗期的SPAD值外,株高、茎粗均未出现显著差异(表1),说明不同施肥处理对前期株高、茎粗等生长指标的影响不明显,对于早期叶绿素含量存在一定影响。3个缓控释肥处理减氮25%与U处理相比,差异不明显,说明减施氮肥对玉米的生产影响不大,继续减氮可能会降低叶绿素含量。收获后玉米茎叶生物量以BU、CU处理较高,各施肥处理间无显著差异。各处理早期玉米植株全氮含量差异不明显(图3),收获后CK茎叶全氮含量显著高于其他施氮处理,说明未施氮处理的植株氮转移与施氮处理存在较大差别;施氮处理间无显著差异,表明不同施肥处理对植株氮含量无影响。总体来看,一次性减量施肥与分次施肥对营养生长的影响差异不明显。



注:不同小写字母表示处理间差异显著 $P < 0.05$ 。下图同。

Note: Different lowercase letters mean significant difference between treatments at $P < 0.05$. The same as following.

图2 不同时期0~30 cm土壤硝态氮和铵态氮动态

Fig.2 Inorganic N dynamic nitrate N and ammonium N in 0-30 cm top soil with different fertilizers during growing stages

表1 不同时期玉米株高、茎粗、叶绿素以及茎叶生物量

Table 1 Plant height, stem diameter, chlorophyll, biomass at different growing stages

处 理 Treatment	株高(cm) Height of plant			茎粗(mm) Diameter of plant			叶绿素(SPAD) Chlorophyll			茎叶生物量(t/hm^2) Biomass
	40 d	50 d	64 d	40 d	50 d	64 d	40 d	50 d	64 d	111 d
CK	154 a	222 a	263 a	18.0 a	22.4 a	22.1 a	47.3 b	56.3 a	57.7 a	4.54 b
U	145 a	225 a	259 a	17.9 a	22.9 a	21.2 a	51.0 a	54.4 a	58.4 a	5.31 ab
DU	150 a	229 a	253 a	17.4 a	22.1 a	22.4 a	48.5 ab	53.0 a	59.5 a	4.78 ab
CU	153 a	229 a	257 a	17.6 a	22.4 a	21.3 a	48.9 ab	53.3 a	60.2 a	6.14 a
BU	157 a	230 a	261 a	17.3 a	21.5 a	22.3 a	50.9 a	54.2 a	58.3 a	6.35 a

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下表同。

Note: Different lowercase letters in the same column mean significant difference between treatments($P < 0.05$). The same below.

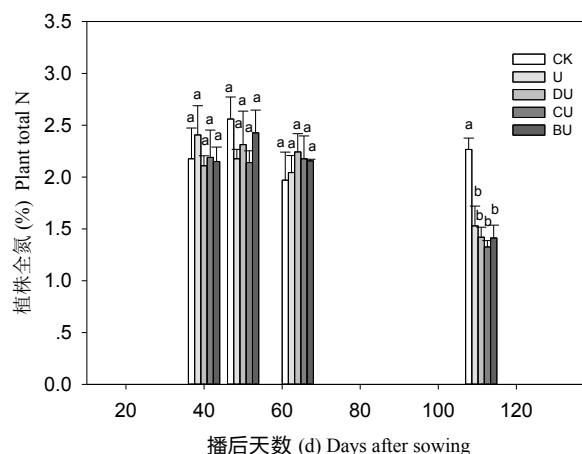


图3 不同时期植株全氮含量的变化

Fig.3 Total N contents of maize plant at different growth stages

2.3 夏玉米产量与氮肥利用效率

不同处理玉米产量存在显著差异, BU处理显著高于CK,增产14.5%,但施氮处理间差异不显著

(表2)。在产量构成因素中, CK处理的百粒重最低,与U处理相比显著下降,从而导致子粒产量出现显著下降。U处理穗粒数最低,与DU和BU处理相比

显著下降,但百粒重最高,因而产量没有显著下降。施氮处理氮肥农学效率与氮肥偏生产力均存在显著差异(表2)。BU处理农学效率和氮肥偏生产力均为最大,其中农学效率显著高于其他处理,氮肥偏生产力显著高于U处理,说明BU处理保持了较高的氮肥利用效率,减少了氮损失的几率。

表2 玉米产量构成与氮肥农学效率、氮肥偏生产力

Table 2 Yield, agronomic efficiency of N fertilizer and partial N productivity under different N fertilizer treatments

处 理 Treatment	穗数(10 ⁴ 穗/hm ²) Spike number	百粒重(g) 100-grain weight	穗粒数 Kernels per spike	子粒产量(t/hm ²) Grain yield	氮肥农学效率(kg/kg) Agronomic efficiency of N fertilizer	氮肥偏生产力(kg/kg) Partial productivity of N fertilizer
CK	6.67	28.0±1.3 b	525±44.9 ab	9.26±0.8 b	—	—
U	6.67	30.3±0.5 a	507±30.4 b	10.2±0.7 ab	3.84 c	42.4 b
DU	6.67	28.1±1.5 ab	551±23.4 a	10.3±0.8 ab	5.68 b	57.1 a
CU	6.67	29.2±0.5 ab	532±6.3 ab	10.2±0.1 ab	5.49 b	56.9 a
BU	6.67	28.4±1.4 ab	566±42.6 a	10.6±0.9 a	7.22 a	58.7 a

2.4 氨挥发和土壤无机氮残留

施氮处理的氨挥发速率在基肥施入后3~5 d内达到峰值(图4),其中U处理排放量最高,达到0.55 kg/(hm²·d),其他依次为CU、BU、DU处理,CK除播种后第1天挥发速率较高外,之后很快降到较低的水平。U处理在大喇叭口期追肥后(第48天)产生

了较大的氨挥发,排放通量迅速上升,达到0.25 kg/(hm²·d),而缓控释肥处理和CK在浇水后仅出现一个小的波动,挥发速率未到0.1 kg/(hm²·d),与U处理差别明显。3个缓控释肥处理在生长中后期总体氨挥发通量均处于较低水平,各缓控释肥处理之间氨挥发速率无显著差异。

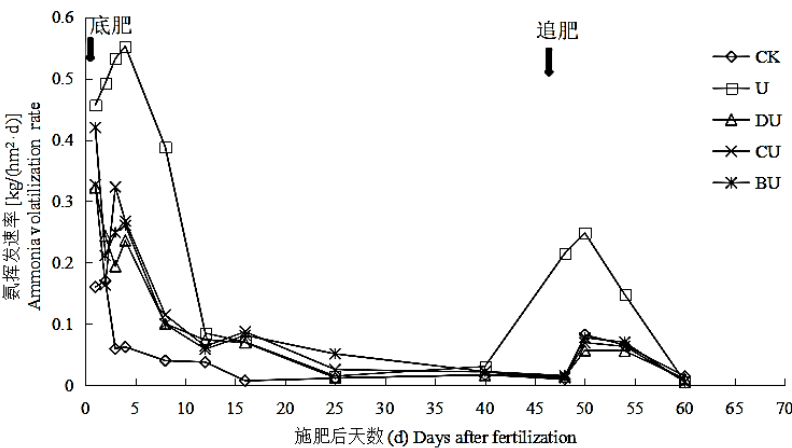


图4 不同处理氨挥发速率动态变化

Fig.4 Dynamic of ammonia volatilization under different treatments

表3 不同处理氨挥发量

Table 3 The amount of ammonia emissions under different treatments

处 理 Treatment	基肥后追肥前(kg/hm ²) After BF before TD	追肥后(kg/hm ²) After TD	氨挥发总量(kg/hm ²) Total NH ₃ volatilization	氨挥发比例(%) NH ₃ volatilization rate
CK	1.15 d	0.59 b	1.75 e	—
U	4.81 a	2.84 a	7.65 a	2.5
DU	2.33 c	0.52 b	2.85 d	0.6
CU	2.70 b	0.53 b	3.23 c	0.8
BU	2.90 b	0.59 b	3.49 b	1.0

注:BF表示基肥;TD表示追肥。
Note: Basal fertilizer, Top-dressing

处理间氮挥发总量存在显著差异,施用基肥后到追肥前以及追肥后两个时期内各处理的挥发量也存在显著差异(表3)。基肥后追肥前挥发损失占总挥发量的63%~84%,其中一次性施肥处理的损失率较高,达到82%~84%。U处理追肥后氮挥发显著高于其他处理,挥发量增加3.81~4.46倍,3个缓控释肥处理与CK的排放量相当,无显著差异。U处理挥发总量显著高于其他处理,与U处理相比,DU、CU、BU处理氮挥发总量分别减少了63%、58%和54%。3个缓控释肥处理之间氮排放总量也存在显著差异,其中DU处理显著低于CU处理,CU处理显著低于BU处理,说明使用抑制剂增效尿素(DU)在控制氮挥发损失上与聚合物包膜控释肥相比可以出现更好的效果,而采用生物炭和抑制剂组合(BU)后氮挥发损失会略大于聚合物包膜尿素,但总体上挥发损失率处于较低水平。

玉米收获后各处理0~90 cm土壤剖面硝态氮、铵态氮总量存在显著差异(表4)。施氮处理硝态氮残留量显著高于CK。不同施氮处理之间,U处理较CU增加41%,而与DU、BU处理无显著差异,CU处理土壤剖面硝态氮残留较低,有利于降低氮淋洗风险。缓控释肥处理的铵态氮累积量较高,其中CU

处理显著高于U和CK处理,增加60%和94%,说明包膜型控释尿素在后期还存在氮形态的转化。从不同土层分布来看(图5),施肥显著增加了各土层硝态氮和铵态氮含量,0~30 cm土层中U处理的硝态氮含量最高,30~60 cm土层BU处理硝态氮最高,下层以DU处理硝态氮含量最高,说明BU、DU处理在中下层累积较为明显,淋洗风险增加。整体来看,CU处理硝态氮淋失风险较小,U处理淋洗风险最高,增效型氮肥减缓了铵态氮的硝化作用有利于硝态氮淋洗阻隔,但一次性施肥播前施氮量较大,中下层硝态氮累积量增加,淋洗损失风险有增加趋势。

表4 收获后0~90 cm土壤剖面硝态氮和铵态氮累积总量
Table 4 The nitrate and ammonium N accumulation in 0-90 cm soil after harvest kg/hm²

处 理 Treatment	硝态氮 Nitrate N	铵态氮 Ammonium N
CK	88.6 c	14.2 b
U	373.0 a	17.2 b
DU	335.0 ab	23.1 ab
CU	264.0 b	27.5 a
BU	350.0 ab	24.2 ab

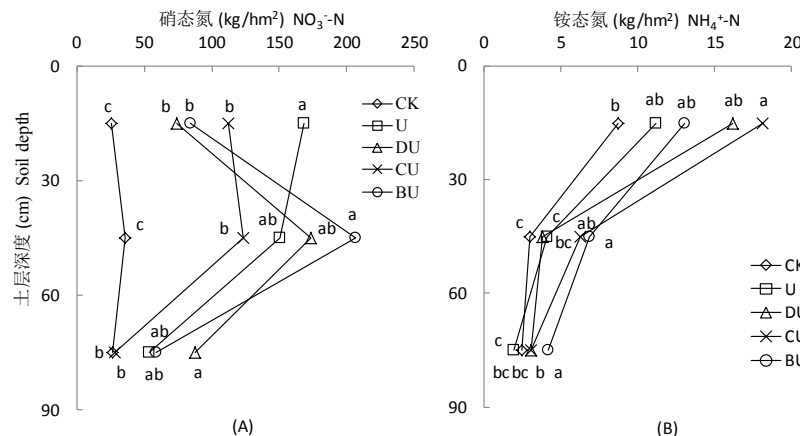


图5 收获后0~90 cm土壤硝态氮和铵态氮分布

Fig.5 The distribution of nitrate N and ammonium N in soil 0-90 cm after harvest

3 结论与讨论

一次性施肥技术是以专用缓控释氮肥为支撑的,缓控释氮肥种类、添加比例、释放期等是精准控制同步氮素供应的重要内容。本研究表明,一次性施用不同种类缓控释肥均能够维持较高的玉米产量,其中施用含抑制剂生物炭涂层尿素的BU处理增产显著。本试验采用了缓释型增效尿素产品,不使用膜层,成本降低且有利于环保^[15]。氮肥全部使

用缓控释产品成本较高,采用常规尿素与缓控释尿素掺混可以实现氮素供应缓速相济和降低成本的目的。包膜尿素的添加比例一般为30%~100%^[16]。本试验中CU处理的聚合物包膜尿素添加比例为33%,与衣文平等所用包膜控释肥添加比例(30%)接近,而低于江丽华等(100%)和郭家萌等(67%)的添加比例^[17]。本试验中增效尿素添加比例为67%,由于增效尿素成本较包膜膜尿素低约1/3,提高添加比例用肥成本不会增加^[18]。本试验不同处理氮素供应与

产量表明,包膜控释肥采用较低的添加比例是可行的,而新型增效尿素提高添加比例后可获得与包膜尿素相同的增产效果,同时可以避免聚合物膜层残留在土壤中。释放期是衡量包膜尿素氮素释放同步作物需求的重要指标^[19,20],本试验中包膜尿素释放期为60 d,而增效尿素为缓释型肥料没有释放期,收获后CU处理硝态氮显著降低、铵态氮显著升高,显示氮素转化活跃,有可能存在氮素释放滞后的现象^[21,22]。本试验BU处理氮肥利用效率最高,一方面与降低氮肥用量有关,同时也与其更加合理的氮素供应有关。BU处理在玉米进入旺盛生长期后维持了相对较高的氮素供应,为玉米关键生长期(喇叭口期)提供了合理的氮素,为增产奠定了基础。U处理通过追肥也提供了充足的氮素供应,但较高的氮肥供应强度(127~162 kg/hm²)并没有对生长、全氮含量以及产量产生影响,可能与大量供氮造成贪青晚熟等有关^[23]。

本研究表明,与U处理的两次施肥相比,一次性施肥降低氨挥发54%~64%,减少0~90 cm土壤硝态氮残留6%~29%,显著降低了氮损失的风险。缓控释肥一次性施肥降低硝态氮淋洗已得到大多数研究的支持^[24]。实际生产中往往需要配施较大比例的普通氮素,这部分氮素进入土壤后,很快开始水解、氨化及硝化反应,这一过程中有大量氮素以气态形式挥发和硝态氮形式留存,加剧损失风险^[25]。本试验中一次性施肥后第25 d表层土壤硝态氮达到122~150 kg/hm²,此时期(7月中旬)正处于北方集中降雨期内,播种后第20~30 d降雨量达到147 mm,较大的降雨量进一步加剧土壤硝态氮的淋洗,收获后30~60 cm土层硝态氮的升高,说明淋洗风险增大。本研究表明,基肥后3~5 d内是挥发量最高的时期,不同施肥方式下一次性施肥挥发速率低于习惯施肥;习惯施肥在追肥后还会出现新的排放峰值,而一次性施肥在中后期的排放量很低。本试验追肥采用撒施后灌水的方法,追肥产生的氨挥发量与沟施相比显著下降。氨挥发不同时期出现排放峰值与环境温度和追肥方法不同有关。本试验中一次性施肥的氨挥发损失(2.85~3.49 kg/hm²)低于其他研究结果(12.2~12.8 kg/hm²),与环境条件及产品特点关系较大^[26]。一次性施肥大幅降低了劳动成本,但其潜在损失风险仍然存在,如何进一步降低用肥成本与氮损失风险仍需进一步研究。

一次性施用包膜控释尿素和增效尿素均可提供充足的氮素供应,含有生物炭涂层的增效尿素与普通尿素掺混在大喇叭口期供氮显著增加,较好地满

足了玉米关键生长期的氮素吸收,有利于增产。一次性施肥显著减少氨挥发损失,降低了硝态氮残留,但包膜尿素成本较高,氮素释放期长,易受环境影响;增效尿素制作简单、释放较快,以含抑制剂生物炭增效尿素综合增产效果较好。在黄淮海北部平原缩短包膜尿素释放期或选用增效尿素还需要进一步研究。

参考文献:

- [1] 刘兆辉,吴小宾,谭德水,等. 一次性施肥在我国主要粮食作物中的应用与环境效应[J]. 中国农业科学, 2018, 51(20): 3827-3839. Liu Z H, Wu X B, Tan D S, et al. Application and environmental effects of one-off fertilization technique in major cereal crops in China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(20): 3827-3839. (in Chinese)
- [2] 高永祥,李若尘,张 民,等. 秸秆还田配施控释掺混尿素对玉米产量和土壤肥力的影响[J/OL]. 土壤学报, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20201019.1656.011.html> Gao Y X, Li R C, Zhang M, et al. Effects of straw returning combined with application of mixture of controlled-release urea and common urea on maize yield and soil fertility[J/OL]. Acta Pedologica Sinica, 2021, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20201019.1656.011.html>. (in Chinese)
- [3] 李雨繁,贾 可,王金艳,等. 不同类型高氮复混(合)肥氨挥发特性及其对氮素平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(3): 615-623. Li Y F, Jia K, Wang J Y, et al. Ammonia volatilization characteristics of different kinds of high-nitrogen compound fertilizers and their effects on nitrogen balance[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(3): 615-623. (in Chinese)
- [4] 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. Yi W P, Shi G F, Wu L, et al. Applications of polymer coated urea with different release time and conventional urea on summer maize growth[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2010, 16(4): 931-937. (in Chinese)
- [5] 衣文平,屈浩宇,许俊香,等. 不同释放天数包膜控释尿素在春玉米上的应用研究[J]. 核农学报, 2012, 26(4): 699-704. Yi W P, Qu H Y, Xu J X, et al. Application of different release duration controlled-release coated urea on spring maize[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2012, 26(4): 699-704. (in Chinese)
- [6] 江丽华,谭德水,李子双,等. 黄淮海平原夏玉米一次性施肥肥料产品的筛选与产量效应[J]. 中国农业科学, 2018, 51(20): 3876-3886. Jiang L H, Tan D S, Li Z S, et al. Fertilizer product screening and yield response about one-off fertilization on summer maize in Huang-Huai-Hai plain[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(20): 3876-3886. (in Chinese)
- [7] 杨 岩,谭德水,江丽华,等. 黄淮海夏玉米一次性施肥技术效应研究[J]. 中国农业科学, 2018, 51(20): 3909-3919. Yang Y, Tan D S, Jiang L H, et al. The effects of one-off fertilization of summer maize in Huang-Huai-Hai region[J]. Scientia Agricultura

- Sinica, 2018, 51(20): 3909–3919. (in Chinese)
- [8] 唐 汉, 王金武, 徐常塑, 等. 化肥减施增效关键技术研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 1–19.
Tang H, Wang J W, Xu C S, et al. Research progress analysis on key technology of chemical fertilizer reduction and efficiency increase[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50 (4): 1–19. (in Chinese)
- [9] 赵 营, 刘晓彤, 罗健航, 等. 缓/控释肥条施对春玉米产量、吸氮量与氮平衡的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020(5): 34–39.
Zhao Y, Liu X T, Luo J H, et al. Yield, N uptake, and apparent N balance in spring maize as affected by side bar application of slow/controlled release fertilizers[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2020(5): 34–39. (in Chinese)
- [10] 周昌明, 李援农, 陈朋朋. 一次性施肥模式对覆膜夏玉米产量与氮素利用的影响[J]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 329–337.
Zhou C M, Li Y N, Chen P P. Effects of single application of fertilizer on yield and nitrogen utilization of mulching summer maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 329–337. (in Chinese)
- [11] Zhang X M, Wu Y Y, Liu X J, et al. Ammonia emissions may be substantially underestimated in China[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(21): 12089–12096. (in Chinese)
- [12] 王朝辉, 刘学军, 巨晓棠, 等. 田间土壤氨挥发的原位测定—通气法[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2): 205–209.
Wang Z H, Liu X J, Ju X T, et al. In-situ determination of ammonia volatilization in field soil – aeration method[J]. Chinese Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2002, 8(2): 205–209. (in Chinese)
- [13] 陈 晓, 谢建萍, 章 燕, 等. 连续流动分析仪测水中氨氮的应用研究[J]. 节能与环保, 2020(4): 74–76.
Chen X, Xie J P, Yi Y, et al. Study on the application of continuous flow analyzer to the determination of ammonia nitrogen in water[J]. Energy Conservation & Environmental Protection, 2020(4): 74–76. (in Chinese)
- [14] 鲍士旦. 土壤化学分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [15] Bai J, Li Y, Zhang J, et al. Straw returning and one-time application of a mixture of controlled release and solid granular urea to reduce carbon footprint of plastic film mulching spring maize[J/OL]. Journal of Cleaner Production. 2021, 280, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124478>.
- [16] 石 宁, 李 彦, 张英鹏, 等. 控释肥对小麦/玉米农田土壤硝态氮累积和迁移的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(20): 3920–3927.
Shi N, Li Y, Zhang Y P, et al. Effects of the controlled release fertilizer on nitrate accumulation and migration in the soil of wheat-maize rotation system[J]. Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018, 51(20): 3920–3927. (in Chinese)
- [17] 郭家萌, 何灵芝, 闫东良, 等. 控释氮肥和尿素配比对不同品种夏玉米氮素累积、转移及其利用效率的影响[J]. 草业学报, 2021, 30(1): 81–95.
Guo J M, He L Z, Yan D L, et al. Effects of controlled release nitrogen and urea ratio on nitrogen accumulation, transfer, and nitrogen use efficiency of different summer maize varieties[J]. Acta Pratacul-turae Sinica, 2021, 30(1): 81–95. (in Chinese)
- [18] 安文博, 孙焱鑫, 李占台, 等. 不同缓控释肥对鲜食玉米产量、品质及氨挥发的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(7): 2422–2430.
An W B, Sun Y X, Li Z T, et al. Effects of different slow/controlled release fertilizers on yield, quality of fresh maize and ammonia emissions[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(7): 2422–2430. (in Chinese)
- [19] Shaviv, A. Advances in controlled release of fertilizers[J]. Advances in Agronomy, 2000, 71: 1–49.
- [20] 李梦月, 胡田田, 崔晓路, 等. 不同释放期控释肥和水氮用量对冬小麦产量的综合影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(23): 153–161.
Li M Y, Hu T T, Cui X L, et al. Comprehensive effects of irrigation water and nitrogen levels for controlled release fertilizer with different release periods on winter wheat yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(23): 153–161. (in Chinese)
- [21] 曹 兵, 李亚星, 徐 凯, 等. 不同释放期的包衣尿素在夏玉米上应用效果研究[J]. 土壤通报, 2009, 40(3): 621–624.
Cao B, Li Y X, Xu K, et al. Effects of coated urea with different release duration on summer corn[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40(3): 621–624. (in Chinese)
- [22] 杨俊刚, 倪小会, 徐 凯, 等. 接触施用包膜控释肥对玉米产量、根系分布和土壤残留无机氮的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(4): 924–930.
Yang J-G, Ni X-H, Xu K, et al. Effects of co-situs application of polymer-coated fertilizers on grain yield, root distribution and soil residual N min in summer maize[J]. Chinese Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2010, 16(4): 924–930. (in Chinese)
- [23] 孙 宁, 边少锋, 孟祥盟, 等. 氮肥施用量对超高产玉米光合性能及产量的影响[J]. 玉米科学, 2011, 19(2): 67–69, 72.
Sun N, Bian S F, Meng X M, et al. Effects of nitrogen application on photosynthetic characteristics and yield in super high-yield maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2011, 19(2): 67–69, 72. (in Chinese)
- [24] 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.
- [25] Zhang Q W, Zhang H, Yi J, et al. The fate of fertilizer derived nitrogen in a rice field in the Qingtongxia irrigation area[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30(8): 1707–1714.
- [26] 张英鹏, 李洪杰, 刘兆辉, 等. 农田减氮调控施肥对华北潮土区小麦-玉米轮作体系氮素损失的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1179–1187.
Zhang Y P, Li H J, Liu Z H, et al. Effect of reducing N and regulated fertilization on N loss from wheat-maize rotation system of farmland in Chao soil region of North China Plain[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(4): 1179–1187. (in Chinese)

(责任编辑:姜媛媛)