

控释尿素与普通尿素配施对春玉米产量、 氮肥利用及经济效益的影响

解文艳¹,周怀平¹,杨振兴¹,刘志平¹,杜艳玲²,郭晋²,吕倩倩²

(1.山西农业大学资源环境学院,山西太原 030031;2.山西大学生物工程学院,山西太原 030006)

摘要:在黄土高原东部春玉米主产区连续3 a开展大田定点试验,设置不施氮(CK)、控释尿素与普通尿素不同配比:0(CRU0%)、25%(CRU25%)、50%(CRU50%)、75%(CRU75%)、100%(CRU100%)共6个施肥处理,研究控释尿素与普通尿素不同配施比例对春玉米产量、氮素利用和经济效益的影响,并建立控释尿素配施比例与产量、氮肥表观利用率和施肥收益之间的关系,以确定最佳配施比例,为筛选适于在黄土高原东部推广应用控释掺混配方肥提供科学依据。研究表明:(1)控释尿素与普通尿素配施能显著提高玉米产量,增加施肥收益,且随着配施比例的增加,2项指标均呈先增加后降低的趋势,其中CRU75%处理的春玉米产量和施肥收益最高,分别较CRU0%处理增加了1 273 kg·hm⁻²(11.9%)和1 735元·hm⁻²(65.7%)。(2)与CRU0%处理相比,控释尿素不同配施比例处理显著提高了玉米氮素利用率、农学效率和偏生产力,提高幅度依次为24.73%~43.87%、38.22%~61.24%和7.45%~11.93%,且均以CRU75%处理最高。(3)控释尿素与普通尿素配施处理显著降低了0~100 cm土层土壤中氮残留量和氮素表观损失量,CRU75%处理氮残留量和氮表观损失量最低,分别为119.8 kg·hm⁻²和247.5 kg·hm⁻²。(4)控释尿素配施比例与春玉米产量、氮肥表观利用率和施肥收益均存在显著一元二次关系,基于此3项指标推算出控释尿素的适宜配施比例分别为64.3%、71.2%和61.8%。控释尿素与普通尿素配合施用有利于促进春玉米生长发育,获得增产增收并提高氮素效率,综合各因素确定黄土高原东部春玉米生产的控释尿素适宜配比为60%~75%。

关键词:控释掺混肥;春玉米;产量;氮肥利用;经济效益

中图分类号:S147.34;S513 **文献标志码:**A

Effects of different ratios of controlled-release urea and common urea on yield, nitrogen utilization and economic benefit of spring maize

XIE Wenyan¹, ZHOU Huaiping¹, YANG Zhenxing¹, LIU Zhiping¹, DU Yanling², GUO Jin², LV Qianqian²

(1. Institute of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taiyuan, Shanxi 030031, China;

2. College of Biological Engineering, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

Abstract: This research aimed to provide theoretical basis for the proportion of controlled-release blended fertilizers suitable for the eastern Loess Plateau, through the study of the effect of different blending proportions between controlled-release urea and common urea on the yield, nitrogen (N) utilization of spring maize and the economic benefit, and the identification of the optimal blending proportion through the establishment of the relationships between parameters including yield, apparent efficiency of N, profit resulting from fertilization and different blending proportions of fertilizers. Fixed-location experiment was carried out in the eastern spring maize producing area on the eastern Loess Plateau for three years consecutively. Six fertilizer treatments were arranged, including no N (CK), 100% common urea (CRU0%), 25% controlled-release urea, and 75% common urea (CRU25%), 50% of controlled-release urea and 50% common urea (CRU50%), 75% controlled-release urea and 25% common urea (CRU75%), and 100% controlled-release urea (CRU100%). The results showed that: (1) The yield of maize and fertilization profit were significantly increased after the combined application of con-

收稿日期:2020-03-23

修回日期:2020-08-30

基金项目:山西省重点研发计划(一般)项目(201703D221008-1);山西省重点研发计划(重点)项目(201703D211002-3,201603D2110-5)

作者简介:解文艳(1978-),女,山西曲沃人,副研究员,博士,主要从事土壤水肥资源可持续利用及水土环境控制研究。E-mail: xwy6018060@163.com

通信作者:周怀平(1964-),男,山西昔阳人,研究员,主要从事旱作农田资源高效利用研究。E-mail: huaipingzhou@126.com

trolled-release urea and common urea, and both rose firstly and then decreased with increasing the proportion of controlled-release urea. The highest yield and fertilization profit of spring maize were found in the treatment of CRU75%. The yield and fertilization profit in CRU75% increased by $1\ 273\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (11.9%) and $1\ 735\ \text{yuan} \cdot \text{hm}^{-2}$ (65.7%), respectively, when compared to those in treatment CRU0%. (2) Compared with the treatment of CRU0%, the combined application of controlled-release urea and common urea significantly improved the N utilization efficiency, agronomic efficiency, and partial productivity of maize by 24.73% ~ 43.87%, 38.22% ~ 61.24%, and 7.45% ~ 11.93%, respectively, with the highest level found in treatment CRU75%. (3) Different combinations of controlled-release urea and common urea significantly reduced the residual N content and apparent loss of N in the soil layer of 0~100 cm, and the lowest values of both parameters were found in the treatment of CRU75%, which were $119.8\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $247.5\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively. (4) On the whole, there was a significant unary quadratic relation between the yield of spring maize, the partial productivity of N fertilizer and the fertilization profits and the blending proportion of controlled-release urea. The appropriate blending proportions of controlled release urea were worked out as 64.3%, 71.2% and 61.8% in terms of yield, partial productivity of nitrogen and fertilization profit, respectively. Combined application of controlled-release urea and common urea was beneficial to the growth and development of spring maize, the yield and income improvement, and N efficiency. According to the performance of all aspects, the optimal proportion of controlled-release urea in the blended fertilizer was 60%~75% for spring maize.

Keywords: controlled-release blending fertilizer; spring maize; yield; nitrogen utilization; economic benefits

氮素是影响玉米生长发育的最重要因素之一,合理施用氮肥是提高玉米产量的重要技术措施^[1-2]。研究表明,中国氮肥利用率为 30%~35%,低于发达国家水平 10%~15%,每年有约 1 500 万 t 氮素(约占氮肥用量的 60%)损失进入大气和水体^[3]。近年来北方地区为追求玉米高产而过量施肥的现象愈加严重,受春季农村劳动力外出务工、人力缺乏等条件限制,许多地区农户施肥方式从基肥+追肥模式转变为底肥一次性施用。单次过量施用氮肥不仅会对玉米的产量和品质产生不良影响,还会严重影响生态环境,引发土壤酸化、地下水污染及大气活性氮排放增加等环境问题^[4-6]。

控释氮肥具有延缓养分释放速率,与作物养分吸收基本同步,有效减少氮肥损失、减轻环境污染、提高肥料利用率等优点^[7-11]。但全量施用控释肥料成本太高^[2],且会造成作物前期供氮不足^[12],可能无法达到既增产又增收的效果^[13],故出现了较多有关控释氮肥与其他肥料混合施用的研究^[2,14-15]。李伟等^[16]研究表明,将控释氮肥减量或将控释与普通氮肥掺混配施有助于解决目前氮肥过量施用引发的问题,控释氮肥与普通尿素掺混施用不仅能提高经济效益,肥效还更优于控释氮肥^[17]。区域气候环境、土壤特性、控释肥料种类、农业措施等因素均是导致最佳掺混配施比例不同的原因。因此,黄土高原东部春玉米生产不能简单借鉴其他地区的控释氮肥施肥指导。本研究通过 3 a 的田间定位试验,

探讨控释尿素与普通尿素不同配施比例对黄土高原东部地区春玉米产量、氮素利用和经济效益的影响,并建立控释尿素配施比例与产量、氮肥表观利用率和施肥收益之间的关系以确定最佳配施比例,为筛选适于在黄土高原东部推广应用控释掺混配方肥提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

长期定位试验于 2016—2018 年在国家农业环境寿阳观测实验站(113°06'E,37°58'N)进行。该实验站海拔 1 130 m,年均气温 7.4℃,≥10℃积温 3 400℃,无霜期约 130 d,年蒸发量 1 600~1 800 mm,年日照时数 2 858.3 h,年均降水量 501.1 mm,70%左右的降水集中在 6—9 月,干燥度为 1.3,属暖温带半湿润偏旱区。试验地块基本平坦,土层深厚,地下水埋深在 10 m 以下。土壤为褐土性土,成土母质为马兰黄土,属黄土旱原地。种植制度为一年一作。试验初始时 0~20 cm 土层土壤基本性质为:有机质 $25.63\ \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 $1.22\ \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全磷 $0.45\ \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全钾 $20.18\ \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮 $81.58\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷 $64.85\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效钾 $172.27\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,缓效钾 $371.08\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH 为 7.9。2016、2017 和 2018 年试验区年降水量分别为 473.7、555.9 mm 和 502.1 mm。

1.2 试验材料

供试肥料:氮肥采用普通尿素(含氮量 46.0%,

中国石油天然气股份有限公司生产)和硫包衣尿素(含氮量 37.0%,汉枫缓释肥料有限公司生产),磷肥采用过磷酸钙(含 P_2O_5 量 16%,云南祥丰化肥股份有限公司生产),钾肥采用氯化钾(含 K_2O 量 60%,浙江浙农爱普贸易有限公司生产)。

供试玉米品种为‘晋单 81’,种植密度 $6.6 \text{ 万株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

1.3 试验方法

1.3.1 试验设计 试验设置 6 个处理:不施氮肥(CK),普通尿素 100%(CRU0%),控释尿素 25%和普通尿素 75%配施(CRU25%),控释尿素 50%和普通尿素 50%配施(CRU50%),控释尿素 75%和普通尿素 25%配施(CRU75%),控释尿素 100%(CRU100%)。每个处理 3 次重复,小区面积 55 m^2 ($5 \text{ m} \times 11 \text{ m}$),随机区组排列。除不施氮处理外,各处理氮(N)、磷(P_2O_5)和钾(K_2O)肥用量分别为 $240, 90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,均在整地后播种前一次性底施,玉米生长期不施肥,无灌溉。玉米播种日期为每年 4 月下旬,收获时间为每年 10 月上旬。各小区栽培管理措施一致,田间管理措施主要是除草和防治病虫害。

1.3.2 测定项目与方法 收获期将各小区玉米全部收获测得籽粒产量。各小区选择有代表性的植株 3 株,秸秆和穗分离,杀青、烘干后全部粉碎;采用 H_2SO_4 -混合加速剂消解,用全自动蒸氮仪 FOSS-Kjeltec 8400 测定植株和籽粒全氮含量。玉米播种前和收获期在每个小区采集 0~300 cm 土层土样,每 20 cm 为一层;用 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCL 进行振荡提取,用全自动间断化学分析仪(SMART CHEM 200,法国 Alliance 公司生产)测定土壤无机氮(NH_4^+-N, NO_3^--N)含量。

施肥收益分析中,2016—2018 年玉米价格分别为 $1.4, 1.6 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.4 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$,普通尿素分别为 $1.35, 1.55 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.95 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$,控释氮肥分别为 $2.4, 2.5 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $2.6 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$,过磷酸钙分别为 $1.2, 1.2 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.4 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$,氯化钾分别为 $3.0, 3.1 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $3.2 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。本研究各处理投入包括耕作投入(播种、翻地、收获等)、材料投入(农药、种子等)和肥料投入,各处理种植、管理等措施一致,所以除肥料投入不同外,其他投入一致。相比不施氮肥处理,各施氮处理的收益由增加的产值减去增加的肥料投入计算得出。

1.4 数据统计与分析方法

试验数据用 Excel 2007 和 SPSS 11.5 统计软件进行统计分析。

参考巨晓棠^[18-19]、王寅^[20]等的方法计算以下参数:

氮肥农学效率

$$NAUE (\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}) = (Y - Y_{CK}) / F_N$$

氮肥偏生产力 $NFP (\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}) = Y / F_N$

土壤氮素依存率 $NCRS (\%) = Y_{CK} / Y$

氮肥表观利用率

$$NAUR (\%) = (U_N - U_{CK}) / F_N \times 100\%$$

氮肥表观残留率

$$NARR (\%) = (IN - IN_{CK}) / F_N \times 100\%$$

氮肥表观损失率

$$NALR (\%) = 100\% - NAUR - NARR$$

施肥收益

$$NFB (\text{元} \cdot \text{hm}^{-2}) = (Y - Y_{CK}) \times P_M - F_N \times P_N$$

式中, Y 表示施氮区产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), Y_{CK} 表示不施氮区产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), F_N 表示施氮量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), U_N 表示施氮区作物吸氮量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), U_{CK} 表示不施氮区作物吸氮量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), IN 表示施氮区土壤无机氮残留量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), IN_{CK} 表示不施氮区土壤无机氮残留量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), P_M 表示玉米价格($\text{元} \cdot \text{kg}^{-1}$), P_N 表示氮肥价格($\text{元} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

2 结果与分析

2.1 不同施氮处理对春玉米产量的影响

由表 1 可知,控释尿素与普通尿素配施处理较单施普通尿素处理增产效果显著,而不同配施比例之间无明显差异。与 CRU0%处理相比,CRU75%的增产幅度最大,3 a 平均增产达 11.89% ($1.27 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$),CRU25%、CRU50%和 CRU100%分别平均增产 7.65% 、 9.31% 和 7.41% 。可见,与单施普通尿素相比,控释尿素与普通尿素的配合施用有助于春玉米获得高产。施氮处理与不施氮对照相比,CRU75%、CRU50%、CRU25%、CRU100%和 CRU0%平均增产率分别为 39.02% 、 35.81% 、 33.75% 、 33.45% 和 24.21% 。

2.2 不同施氮处理对春玉米收获期地上部干物质量和氮素吸收量的影响

如表 1 所示,春玉米收获期地上部干物质量和氮素吸收量在不同处理间存在显著差异。3 a 平均数据显示,CRU75%处理的干物质量最高,达 $23.58 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,较不施氮肥(CK)处理提高 31.53% ($5.66 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$),较 CRU0%处理提高 10.88% ($2.31 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)。各处理 3 a 平均地上部干物质量大小顺序为 $CRU75\% > CRU50\% > CRU100\% > CRU25\% >$

CRU0%>CK。春玉米 3 a 连作中,收获期氮素吸收量均以 CK 处理最低,施氮后氮素吸收量显著提高,且随控释尿素配施比例的提高呈先升高后降低的趋势。CRU75%处理的地上部吸氮量 3 a 平均为最高,高达 267.07 kg·hm⁻²。3 a 平均结果显示,与 CRU0%处理相比,CRU75%、CRU50%、CRU100%和 CRU25%地上部吸氮量平均提高了 15.47%、11.66%、10.06%和 5.85%。

2.3 不同施氮处理对氮素利用的影响

2.3.1 对氮肥利用的影响 由表 2 可知,3 a 不同控释尿素与普通尿素配施处理之间的氮素利用效率有明显的差异。CRU75%的氮肥农学利用效率最高,与 CRU0%处理相比,3 a 平均提高了 5.32 kg·kg⁻¹,CRU25%、CRU50%和 CRU100%的氮肥农学利用效率 3 a 平均提高了 3.43、4.17 kg·kg⁻¹和 3.32 kg·kg⁻¹。CRU0%处理 3 a 春玉米的氮肥偏生产力平均为 44.61 kg·kg⁻¹。控释尿素与普通尿素配施各

处理氮肥偏生产力均有所提高,且整体上随配施比例的增加呈先升高后降低的趋势。氮肥偏生产力在控释尿素配施比例为 75%时最高,平均为 49.93 kg·kg⁻¹。土壤氮素依存率与氮肥农学效率和氮肥偏生产力变化规律相反,整体上随控释尿素配施比例的增加呈先下降后升高的趋势,平均土壤氮素依存率从 CRU0%处理的 80.74%显著降至 CRU75%处理的 71.97%,后升至 CRU100%处理的 75.06%。2018 年各处理的氮肥农学效率和氮肥偏生产力均最高,土壤氮素依存率最低。

2.3.2 对春玉米连作周期内土壤-作物系统氮素平衡的影响 由三季春玉米连作的土壤-作物系统氮素平衡状况可以看出(表 3):(1)氮素输入项中,施用氮肥带入氮素为主要方式,占施氮处理氮素总输入量的 61.6%,氮素矿化量和播前土壤无机氮量分别占氮素总输入量的 24.6%和 13.8%;(2)氮素输出方式以作物吸收带走氮素为主,平均占氮素总输出

表 1 不同处理春玉米产量、地上部干物质质量和氮素吸收量

Table 1 Effect of different treatments on spring maize yield, dry matter and nitrogen uptake

年份 Year	处理 Treatment	产量/(t·hm ⁻²) Yield	增产率/% Rate of growth	干物质量/(t·hm ⁻²) Dry matter	氮素吸收量/(kg·hm ⁻²) N uptake
2016	CK	8.07c	0.00	17.3c	157.8d
	CRU0%	9.86b	22.23	20.0b	198.6c
	CRU25%	10.83a	34.18	21.3ab	219.5b
	CRU50%	10.99a	36.20	22.0a	232.9a
	CRU75%	11.16a	38.30	22.3a	244.1a
	CRU100%	10.75a	33.22	20.4b	230.5a
2017	CK	8.71c	0.00	19.0c	190.7c
	CRU0%	10.35b	18.88	22.4b	242.7b
	CRU25%	11.11a	27.55	22.8b	251.9b
	CRU50%	11.41a	31.00	23.6ab	268.7a
	CRU75%	11.96a	37.36	25.5a	278.5a
	CRU100%	11.17a	28.25	23.6ab	267.4a
2018	CK	9.09c	0.00	17.5c	182.2c
	CRU0%	11.90b	30.96	21.5b	252.6b
	CRU25%	12.65a	39.16	22.0a	263.1a
	CRU50%	12.72a	39.93	22.8a	273.1a
	CRU75%	12.83a	41.11	23.0a	278.6a
	CRU100%	12.59a	38.50	22.1a	265.8a

注:同列不同字母表示相同年份不同处理间差异显著($P<0.05$),下同。

Note: Different letters in the same column indicate significant difference among treatments in the same year ($P<0.05$), the same below.

表 2 不同处理的氮肥利用指标

Table 2 Effect of different treatments on nitrogen utilization indicators

处理 Treatment	氮肥农学效率 NAUE/(kg·kg ⁻¹)			氮肥偏生产力 NFPF/(kg·kg ⁻¹)			土壤氮素依存率 NCRS/%		
	2016	2017	2018	2016	2017	2018	2016	2017	2018
CRU0%	7.50c	6.85c	11.74b	41.10c	43.14c	49.60b	81.76a	84.13a	76.34a
CRU25%	11.51b	10.00b	14.85a	45.12ab	46.29b	52.71a	74.48b	78.41b	71.83b
CRU50%	12.19ab	11.25b	15.14a	45.80ab	47.54b	53.00a	73.37bc	76.35b	71.44b
CRU75%	12.90a	13.55a	15.58a	46.50a	49.85a	53.44a	72.26c	72.81c	70.85b
CRU100%	11.19b	10.25b	14.59a	44.80b	46.54b	52.46a	75.02b	77.98b	72.18b

表3 不同处理对春玉米连作周期内土壤-作物系统氮素平衡的影响/(kg·hm⁻²)

Table 3 Effect of different treatments on N balance in soil-crop system during maize succession system

氮输入输出 N input and output	项目 Item	CK	CRU0%	CRU25%	CRU50%	CRU75%	CRU100%
第一季(2016年) 氮输入 N input in 2016	施氮量 N application rate	0	240	240	240	240	240
	播前土壤无机氮量 Soil inorganic N before sowing	161.0	161.0	161.0	161.0	161.0	161.0
	氮矿化量 N mineralization	82.7	82.7	82.7	82.7	82.7	82.7
	总输入量 Total input	243.7	483.7	483.7	483.7	483.7	483.7
第一季(2016年) 氮输出 N output in 2016	作物吸收 Crop uptake	157.8	198.6	219.5	232.9	244.1	230.5
	土壤无机氮残留量 Soil residual inorganic N	85.9	175.7	163.2	164.5	155.6	159.5
	表观损失 Apparent N loss	0.0	109.5	101.0	86.3	84.0	93.6
	氮盈余 N surplus	85.9	285.1	264.2	250.8	239.6	253.2
第二季(2017年) 氮输入 N input in 2017	施氮量 N application rate	0	240	240	240	240	240
	播前土壤无机氮量 Soil inorganic N before sowing	158.0	210.9	203.4	201.9	190.0	206.3
	氮矿化量 N mineralization	98.7	98.7	98.7	98.7	98.7	98.7
	总输入量 Total input	256.7	549.6	542.1	540.6	528.7	545.0
第二季(2017年) 氮输出 N output in 2017	作物吸收 Crop uptake	190.7	242.7	251.9	268.7	278.5	267.4
	土壤无机氮残留量 Soil residual inorganic N	65.9	154.7	152.9	148.2	140.6	142.4
	表观损失 Apparent N loss	0.0	152.1	137.3	123.7	109.6	135.2
	氮盈余 N surplus	65.9	306.8	290.2	271.9	250.2	277.6
第三季(2018年) 氮输入 N input in 2018	施氮量 N application rate	0	240	240	240	240	240
	播前土壤无机氮量 Soil inorganic N before sowing	126.3	196.3	187.5	181.3	179.4	185.7
	氮矿化量 N mineralization	106.1	106.1	106.1	106.1	106.1	106.1
	总输入量 Total input	232.4	542.4	533.6	527.4	525.5	531.8
第三季(2018年) 氮输出 N output in 2018	作物吸收 Crop uptake	182.2	252.6	263.1	273.1	278.6	265.8
	土壤无机氮残留量 Soil residual inorganic N	50.2	140.8	130.1	122.7	119.8	130.8
	表观损失 Apparent N loss	0.0	149.0	140.3	131.6	127.1	135.2
	氮盈余 N surplus	50.2	289.8	270.4	254.3	246.9	266.0
3季(2016—2018年) 氮输入 N input from 2016 to 2018	施氮量 N application rate	0	720	720	720	720	720
	播前土壤无机氮量 Soil inorganic N before sowing	161.0	161.0	161.0	161.0	161.0	161.0
	氮矿化量 N mineralization	287.5	287.5	287.5	287.5	287.5	287.5
	总输入量 Total input	448.5	1168.5	1168.5	1168.5	1168.5	1168.5
3季(2016—2018年) 氮输出 N output from 2016 to 2018	作物吸收 Crop uptake	530.8	693.9	734.5	774.7	801.2	763.7
	土壤无机氮残留量 Soil residual inorganic N	50.2	140.8	130.1	122.7	119.8	130.8
	表观损失 Apparent N loss	-132.5	333.8	303.9	271.1	247.5	274.0
	氮盈余 N surplus	-82.3	474.6	434.0	393.8	367.3	404.8

量的64.5%(59.4%~68.6%);(3)氮素盈余项中,各处理土壤无机氮残留量和表观损失在3 a里均存在差异,其中,CRU75%处理由于大部分氮素被作物吸收利用,其无机氮残留量和氮素表观损失最低,最终氮素表观盈余最少。三季春玉米连作后,各处理的土壤无机氮残留量大小顺序依次为CRU0%>CRU100%>CRU25%>CRU50%>CRU75%,氮素表观损失量大小顺序依次为CRU0%>CRU25%>CRU100%>CRU50%>CRU75%。3 a平均来看,与CRU0%处理相比,CRU25%、CRU100%、CRU50%和CRU75%处理的氮素表观盈余分别下降40.6 kg·hm⁻²(8.6%)、69.8 kg·hm⁻²(14.7%)、80.8 kg·hm⁻²(17.0%)和107.3 kg·hm⁻²(22.6%)。

2.3.3 对春玉米连作周期内氮肥表观利用、残留和损失的影响 2016—2018年春玉米连作体系中氮肥的表观利用率、残留率及损失率(表4)显示,控释尿素与普通尿素配施显著提高了春玉米的氮肥表观利用率,降低氮肥表观残留率和氮肥表观损失

率。3 a连作体系中,CRU75%处理的平均氮肥表观利用率高达37.6%,CRU50%、CRU100%、CRU25%和CRU0%处理的平均氮肥表观利用率分别为33.9%、32.4%、28.3%和22.7%。与CRU0%处理相比,CRU75%、CRU50%、CRU100%和CRU25%处理平均氮肥表观利用率分别提高了65.64%、49.34%、42.73%和24.67%。3 a平均来看,与CRU0%处理相比,CRU75%、CRU100%、CRU50%和CRU25%处理的氮肥表观残留率分别降低了20.58%、14.35%、13.37%和9.32%,CRU75%、CRU50%、CRU100%和CRU25%处理的氮肥表观损失率分别降低了18.18%、15.74%、10.98%和5.54%。

2.4 不同施氮处理对春玉米经济效益的影响

图1表明,3 a试验CK处理春玉米产值平均为12 650元·hm⁻²;施氮后显著提高,从CRU0%处理的15 681元·hm⁻²增加至CRU75%处理的17 575元·hm⁻²,而后有所降低。控释尿素与普通尿素配施处理的氮肥施肥收益明显高于普通尿素处理,3 a平

均提高了 957~1 735 元·hm⁻², 3 a 平均增收率为 36.2%~65.6%。CRU75%处理的施氮肥收益显著高于其他处理。

2.5 春玉米控释尿素的适宜配施比例

对不同年份的控释尿素配施比例与春玉米产量、氮肥表观利用率和施肥收益之间的关系进行拟合表明(表 5), 每年 3 项指标与控释尿素配施比例均呈显著的一元二次关系。根据一元二次模型方程, 以产量为指标时各试验春玉米的控释尿素最佳配施比例分布在 63.4%~65.3%之间, 以氮肥表观利用率为指标时分布在 64.3%~78.0%之间, 以施肥收益为指标时分布在 60.6%~63.1%之间。

以 x 为控释尿素配施比例, 与玉米产量的方程模型为 $y = -2863x^2 + 3682x + 10719$ ($R^2 = 0.958$), 与氮肥表观利用率的方程模型为 $y = -26.99x^2 + 38.46x + 21.85$ ($R^2 = 0.937$), 与施肥收益的方程模型为 $y = -4225x^2 + 5225x + 2655$ ($R^2 = 0.948$)。由上述方程模

型推算得出, 控释尿素配施比例为 64.3%、71.2%、61.8%时玉米产量最高、氮肥利用率最佳、施肥收益最好。综合各因素确定黄土高原东部春玉米生产的控释尿素适宜配比为 60%~75%。

3 讨论

控释氮肥与普通尿素的配合施用效果受作物的养分需求特性、气候状况、土壤条件及种植模式等多方面因素影响^[12]。众多影响因素中以气候因素的影响最为强烈, 主要原因是温度和水分显著影响控释氮肥的养分释放特征及其在土壤中的转化运移过程, 适宜掺混比例可以调控养分供应, 从而实现与作物吸收在时间和空间上的同步^[12,21]。本研究区域 2016、2017 年和 2018 年春玉米生育期内降水量分别为 327.39、367.68 mm 和 446.97 mm, 分别为偏早年、平水年和丰水年。3 a 田间试验发现, 硫包衣尿素与普通尿素配施各处理与普通尿素处理

表 4 不同处理对春玉米连作周期内氮肥表观利用、残留和损失的影响/%

Table 4 Effect of different treatments on N apparent utilization rate, residual rate and loss rate in maize succession system

处理 Treatment	NAUR			NARR			NALR		
	2016	2017	2018	2016	2017	2018	2016	2017	2018
CRU0%	17.0d	21.7d	29.3c	37.4a	37.0a	37.8a	45.6a	41.4a	32.9a
CRU25%	25.7c	25.5c	33.7b	32.2b	36.2ab	33.3b	42.1a	38.3ab	33.0a
CRU50%	31.3b	32.5b	37.9a	32.7b	34.3b	30.2c	36.0bc	33.3bc	31.9ab
CRU75%	36.0a	36.6a	40.2a	29.0c	31.1c	29.0c	35.0c	32.3c	30.8b
CRU100%	30.3b	32.0b	34.8b	30.7c	31.8c	33.6b	39.0b	36.2b	31.6ab

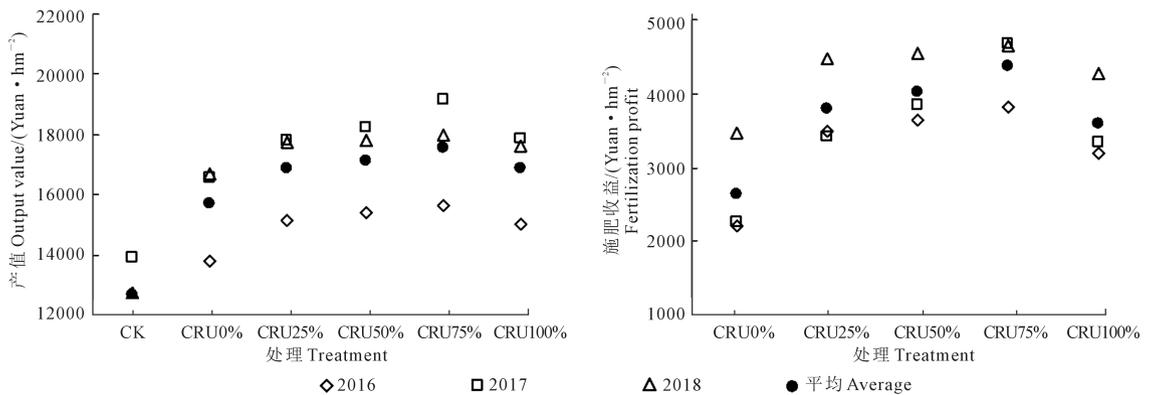


图 1 不同处理对春玉米产值和施肥收益的影响

Fig.1 Effect of different treatments on output and fertilization profit of spring maize

表 5 控释尿素最佳配施比例与玉米产量、氮肥表观利用率、偏生产力和施肥利润的关系

Table 5 Optimal ratio of controlled release urea and common urea based on grain yield, NAUR, and fertilization profit

年份 Year	模型类型 Model type	产量 Yield	决定系数 R^2	氮肥表观利用率 NAUR	决定系数 R^2	施肥利润 Fertilization profit	决定系数 R^2
2016	一元二次	63.4	0.967*	71.2	0.965*	60.6	0.961*
2017	Univariate quadratic equation	65.3	0.884*	64.3	0.900*	63.1	0.868*
2018		64.0	0.947*	78.0	0.916*	61.5	0.938*
平均 Average		64.3	0.958*	71.8	0.937*	61.8	0.948*

注: * 表示显著性差异 ($P < 0.05$)。

Note: * means significant difference ($P < 0.05$).

相比增产效果显著,2016、2017年和2018年增产幅度分别为9.04%~13.19%、7.34%~15.59%和5.79%~7.79%。本研究的前期结果表明,在黄土高原东部春玉米主产区,不同控释氮肥处理能够明显提高春玉米产量,其中硫包衣尿素效果最好^[22]。本研究试验田块土壤养分状况、种植和管理措施一致,因此,硫包衣尿素的肥效受本区域气候条件的变化影响较小,适宜在本区域推广应用。

氮肥合理运筹的最终目的是减少施肥量、降低劳动力投入、保证作物高产、减轻氮素残留,达到经济效益和环境效益的统一^[21]。本研究中,全部施用普通尿素,一方面易造成玉米生长的前期可供应氮量高于玉米实际需求量,导致肥料氮素的浪费和增加环境污染风险(表3和表4),另一方面会使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。全部施用控释氮肥,一方面会导致成本增加而经济收益降低,大多数农户难以接受;另一方面玉米生育前期养分释放缓慢,在氮素需求量大的时期,不能满足植株养分需求,即使后期氮肥供应充足,仍会影响产量(表1);另外控释氮肥的养分释放受气候因素特别是水分和温度的影响较大,田间生产中气候具有不确定性,100%施用控释氮肥可能会对玉米产量或环境造成不利影响。因此,采用控释尿素与普通尿素合理配合施用是经济可行的一次性施肥技术。

王寅等^[12]研究表明,东北地区春玉米施N量为185 kg·hm⁻²时,控释氮肥与尿素掺混施用相比普通尿素一次性全施可增加植株氮素吸收,显著提高春玉米产量;且控释氮肥掺混比例在30%时产量最高,较普通尿素一次性基施增产9.0%。李伟等^[16-17]研究表明,在等氮(N180 kg·hm⁻²)条件下,控释掺混处理夏玉米产量以控氮比50%处理最高,比常规施肥处理增产9.43%。本研究结果表明,黄土高原东部春玉米施N量为240 kg·hm⁻²条件下,随着控释尿素比例的增加,春玉米产量呈现先升高后降低的趋势,其中,控释尿素配施比例在75%时产量最高,较普通尿素一次性基施增产11.89%。本研究结果与冯小杰等^[23]在辽中南地区的研究结果一致(施氮量为240 kg·hm⁻²和220 kg·hm⁻²)。

氮肥利用率、农学效率和偏生产力是表征氮肥利用效率的重要指标^[24]。王寅等^[12]研究表明,控释氮肥与尿素掺混施用有利于维持较高的土壤氮素水平,减少氮素损失,从而提高氮肥利用率。施用控释尿素显著提高水稻、玉米、小麦等作物的氮肥利用率和氮肥农学效率^[16,25-26]。本研究结果表

明,控释尿素与普通尿素配施处理的氮肥农学效率、氮肥偏生产力和氮肥利用率均显著高于普通尿素处理,且随配施比例的增加,三者均呈先升高后降低趋势。当控释尿素与普通尿素配施比例为75:25施用时,氮肥农学效率、氮肥偏生产力和氮肥利用率最高,分别为14.01 kg·kg⁻¹、49.93 kg·kg⁻¹和37.57%。于飞等^[24]研究表明,当前我国玉米氮肥用量180~240 kg·hm⁻²时,氮肥农学效率、氮肥偏生产力和氮肥表观利用率分别为10.3 kg·kg⁻¹、45.5 kg·kg⁻¹和31.0%。本研究结果表明氮肥利用率的3项指标均高于目前中国氮肥利用率的平均水平。

合理施氮除了要考虑产量和经济效益等指标外,同时还应将施肥后植物—土壤系统的氮素平衡状况和氮素去向考虑在内^[12]。戴明宏等^[27]对春玉米的研究表明,习惯施肥处理(普通尿素240 kg·hm⁻²分次施用)的氮肥表观损失率为42.6%。王寅等^[12]研究表明,两季连作春玉米表观残留率在控释氮肥掺混施用后均显著提高,而表观损失率从普通尿素一次性全施处理的37.3%显著下降至掺混比例为45%时的6%。本研究结果表明,三季连作春玉米在普通尿素一次性全施处理的氮肥表观损失率和残留率分别为40.0%和37.4%,控释尿素与普通尿素混施显著降低了氮肥表观损失率和表观残留率。其中,掺混比例为75%的处理降低效果更明显,较普通尿素处理分别下降18.18%和20.58%。

土壤无机氮残留量过高是导致氮素损失的重要原因,因此其被要求控制在一定范围内以兼顾作物吸收与环境友好。钟茜等^[28]研究表明,中国华北冬小麦—夏玉米轮作区土壤无机氮的残留量不宜超过150 kg·hm⁻²,而欧盟国家一般要求0~90 cm土层硝态氮残留应低于90 kg·hm⁻²。本研究中,相比普通尿素一次性全施处理,控释尿素与普通尿素混施处理可以降低土壤中的无机氮残留量。控释尿素与普通尿素混施处理3个生长季的土壤无机氮残留量分布在119.8~130.8 kg·hm⁻²之间,总体上处于较适宜水平。掺混比例为75%时的土壤无机氮残留量最低,三季连作春玉米后为119.8 kg·hm⁻²。因此,从土壤—植物系统氮素平衡的观点看,控释尿素与普通尿素掺混施用技术通过减少氮素表观损失,降低土壤氮素盈余,从而增加植株氮素吸收,提高了氮肥利用率。

本研究3a田间定点试验研究显示,黄土高原东部春玉米施N量为240 kg·hm⁻²时,随着控释尿素比例的增加,春玉米产量、氮素表观利用率和施

肥收益均呈现先升高后降低的趋势,春玉米产量、氮素利用率和施肥收益最佳的配施比例分别为 64.3%、71.2%和 61.8%。因此,从产量、氮素效率和施肥收益等方面综合考虑,黄土高原东部春玉米主产区控释尿素的最佳配施比例为 60.0%~75.0%。各个学者关于控释尿素与普通尿素掺混施用研究结果差异较大,根本原因是地域差异,因为不同的区域环境气候、土壤类型及养分含量不同,同时还受控释氮肥种类等的影响。因而开展地域性研究,筛选出适宜本区域的最佳控释尿素及其配施比例对农业生产具有重要的现实意义。

4 结 论

科学的控释尿素与普通尿素配合施用能够提高春玉米产量,促进植株氮素吸收,提高肥料利用效率,同时减少氮素表观损失,降低土壤氮素盈余,增加经济效益,因而可作为推荐的一次性施肥技术。从玉米产量、氮素利用和施肥收益等方面综合考虑,当前生产条件下,黄土高原东部春玉米主产区控释尿素的最佳配施比例为 60.0%~75.0%。

参 考 文 献:

[1] 纪德智,王端,赵京考,等.不同氮肥形式对玉米氮、磷、钾吸收及氮素平衡的影响[J].水土保持学报,2014,28(4):104-109.

[2] 金容,李兰,郭萍,等.控释氮肥比例对土壤氮含量和玉米氮素吸收利用的影响[J].水土保持学报,2018,32(6):212-221.

[3] 刘红恩,李金峰,刘世亮,等.施用控释 BB 肥对冬小麦产量、氮素累积和氮肥利用率的影响[J].西北农业学报,2017,26(9):1311-1316.

[4] Hu H Y, Ning T Y, Li Z J, et al. Coupling effects of urea types and subsoiling on nitrogen-water use and yield of different varieties of maize in northern China [J]. Field Crops Research, 2013, 142(1):85-94.

[5] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands [J]. Science, 2010, 327(5968):1008-1010.

[6] Liu X J, Zhang Y, Han W X, et al. Enhanced nitrogen deposition over China [J]. Nature, 2013, 494(7438):459-462.

[7] 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.

[8] 周培禄,任红,齐华,等.氮肥用量对两种不同类型玉米杂交种物质生产及氮素利用的影响[J].作物学报,2017,43(2):263-276.

[9] 樊小林,廖宗文.控释肥料与平衡施肥和提高肥料利用率[J].植物营养与肥料学报,1998,4(3):219-223.

[10] 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.

[11] 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]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2008, 81(1):37-47.

[12] 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.

[13] 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.

[14] 刘诗璇,陈松岭,蒋一飞,等.控释氮肥与普通氮肥配施对东北春玉米氮素利用及土壤养分有效性的影响[J].生态环境学报,2019,28(5):939-947.

[15] Zheng W K, Zhang M, Liu Z G, et al. Combining controlled-release urea and normal urea to improve the nitrogen use efficiency and yield under wheat-maize double cropping system [J]. Field Crops Research, 2016, 197(13):52-62.

[16] 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.

[17] 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.

[18] 巨晓棠,刘学军,邹国元,等.冬小麦/夏玉米轮作体系中氮素的损失途径分析[J].中国农业科学,2002,35(12):1493-1499.

[19] 巨晓棠,张福锁.关于氮肥利用率的思考[J].生态环境学报,2003,12(2):192-197.

[20] 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.

[21] 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.

[22] 解文艳,周怀平,杨振兴,等.不同缓控释氮肥对连作春玉米产量及氮肥去向的影响[J].水土保持学报,2019,33(3):207-214.

[23] 冯小杰,战秀梅,王雪鑫,等.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[J].中国农业科学,2019,52(10):1733-1745.

[24] 于飞,施卫明.近 10 年中国大陆主要粮食作物氮肥利用率分析[J].土壤学报,2015,52(6):1311-1324.

[25] 黄巧义,唐桂虎,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):639-646.

[26] 刘飞,张民,诸葛玉平,等.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[J].植物营养与肥料学报,2011,17(6):1351-1358.

[27] 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.

[28] 钟茜,巨晓棠,张福锁.华北平原小麦/夏玉米轮作体系对氮素环境承受力分析[J].植物营养与肥料学报,2006,12(3):285-293.