



氮肥减量下缓释肥和尿素配施对黄土高原 春玉米氮素利用和产量效益的影响

胡迎春¹, 韩云良^{1,2}, 施成晓^{1,3}, 宋端朴¹,
李雨泽¹, 温晓霞¹, 秦晓梁¹, 廖允成¹

(1.西北农林科技大学 农学院, 陕西杨凌 712100; 2.周至县特色产业服务中心, 陕西周至 710400;
3.国家缓控释肥工程技术研究中心, 金正大生态工程集团股份有限公司, 山东临沭 276700)

摘 要 针对黄土高原春玉米生产中过量施肥和效益较低的问题, 研究氮肥减量下缓释肥 (Slow-release Urea, 简称 C) 和尿素 (Urea, 简称 U) 配施对春玉米干物质、地上部氮素积累量、产量、品质以及经济效益的影响。于 2017 和 2018 年在长武试验站进行试验, 以半膜覆盖下的春玉米为研究对象, 设置 5 种处理: 不施氮肥 (CK)、常规施肥模式为全尿素施肥 (100%U, N 225 kg · hm⁻²)、缓释肥和尿素 7:3 配施 (100%CU, N 225 kg · hm⁻²)、氮肥减量 20% 下的缓释肥和尿素 7:3 配施 (80%CU, N 180 kg · hm⁻²)、氮肥减量 40% 下的缓释肥和尿素 7:3 配施 (60%CU, N 135 kg · hm⁻²)。结果表明: 与施氮量 225 kg · hm⁻² 相比, 氮肥减量下的缓释肥和尿素配施处理均显著提高了氮肥利用率和氮肥偏生产力。与常规施肥相比, 2 a 的收获期 80%CU 处理均提高了土壤硝态氮质量分数, 而干物质、地上部氮素积累量、土壤铵态氮质量分数以及籽粒品质与之无显著差异。不同施氮处理中, 80%CU 在 2 a 均收获了最高的产量, 与 100%U 和 100%CU 相比无显著差异, 但显著高于 60%CU。从经济效益来看, 80%CU 处理下春玉米生产中的纯利润最高, 平均纯利润为 11 122 元 · hm⁻², 平均每年比 100%U 增加 189 元 · hm⁻²。综上, 在黄土高原地区氮肥减量 20% 下缓释肥和尿素配施可以实现减氮增效的目标。

关键词 黄土高原; 春玉米; 缓释肥; 产量; 氮素利用效率

中图分类号 S314; S513

文献标志码 A

文章编号 1004-1389(2019)07-1068-11

地膜覆盖技术在黄土高原地区的大面积推广应用, 极大促进了该区域春玉米产量的提高^[1-2], 但是目前覆膜下玉米生产中存在过量施氮现象, 导致氮肥利用效率总体偏低^[3]。尿素作为该地区主要氮肥施用形态, 其过量施用不仅增加了生产成本, 而且影响到土壤中碳氮的矿化及其过程, 使土壤中硝态氮残留过高, 造成地下水污染、土壤酸化和氨挥发量升高等环境问题^[4-6]。当氮肥的施用量超出作物的需求, 会使作物贪青晚熟, 无效分蘖增多, 抗虫和抗病能力降低^[7-8], 作物产量反而会下降^[9-10], 因此在农业生产中通过合理施肥来提高作物产量显得尤为重要。

氮肥的优化管理是作物高产的重要保障, 有

效的氮肥管理包括氮肥的施用时间、施用量和施用次数以及不同的肥料配施^[11]。以基肥和追肥 2 次施肥供应作物生长, 这种肥料分开使用的方式能提高作物产量和氮素使用效率, 但是 2 次施肥会造成人工成本的增加, 尤其是劳力成本的增加^[12]。缓释肥能够很好地缓解这种状况, 通过一次性施肥使作物整个生育期养分需求得到供应, 可节省更多的劳动力^[13-14]。同时, 缓释肥养分释放缓慢, 能够保持作物整个生育期土壤的氮素水平^[15-16], 提高作物产量和氮素利用效率^[17-20], 而且还能减小氮素损失带来的环境污染问题。但是由于缓释肥价格偏高, 在大田生产中应用较少。大量施用会导致成本增加而经济收益降低, 难以

收稿日期: 2019-03-18 修回日期: 2019-04-25

基金项目: 公益性行业 (农业) 科研专项 (201503121); 国家自然科学基金 (31701384); 陕西省科技统筹创新工程计划 (2016KTCI02-08); 中国博士后基金 (2017M623258)

第一作者: 胡迎春, 男, 硕士研究生, 研究方向为高效农作制度。E-mail: 839151270@qq.com

通信作者: 廖允成, 男, 博士, 教授, 研究方向为农业生态和高效农作制度。E-mail: yunchengliao@163.com

秦晓梁, 男, 博士, 副教授, 研究方向为旱区水肥高效利用。E-mail: xiaoliangqin2006@163.com

被大多数农户接受。

目前已经有一些关于缓释肥和尿素掺混施用在玉米方面的研究^[21-22]。姬景红等^[23]研究表明缓释肥和尿素按一定比例配施能够延缓叶片衰老,提高春玉米产量和收益。衣文平等^[24]在缓释肥和尿素配施研究中发现,不同用量的缓释肥和尿素配施均能提高夏玉米产量,籽粒氮素积累量和经济收益,缓释肥的用量占总施氮量的 30% 时效果最佳。李伟等^[25]在山东夏玉米上的研究结果显示,包膜尿素和普通尿素掺混施用较常规施肥在 0~60 cm 土层均能保持较高的硝态氮,且控释氮肥的比例在 50% 时产量和氮肥利用效率较高。然而关于氮肥减量下缓释肥和尿素配施的研究并不多见,而且在西北地区覆膜春玉米的生产中还没有类似的研究。

张宁宁^[26]的研究发现,渭北旱塬地区缓释肥和普通尿素最适宜比例为 7:3,本试验在原有施肥基础上减少氮素用量,设置 5 种处理:不施氮肥、常规施肥模式(全尿素施肥)、缓释肥和尿素 7:3 配施、氮肥减量 20% 下的缓释肥和尿素 7:3 配施、氮肥减量 40% 下的缓释肥和尿素 7:3 配施,研究氮肥减量下缓释肥和尿素配施对植株干物质积累量、氮素质量分数、氮素分配和土壤无机氮,以及对作物产量、品质和相关的经济效益进行分析,从而为在黄土高原地区科学施肥、生态环境保护 and 农业可持续发展提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

于 2017 年和 2018 年在中国科学院长武农业生态试验站(35°12'N,107°40'E)进行试验,该试

验站属暖温带半湿润大陆性季风气候,海拔 1 200 m,年均降雨量 584 mm,年均气温 9.1 °C,无霜期 171 d,地下水深埋 50~80 m,无灌溉条件,农作物以春玉米为主,属典型的旱作农业一熟区;试验区土壤为黏黑垆土,有机质 9.14 g·kg⁻¹,碱解氮 66.5 mg·kg⁻¹,速效磷 10.71 mg·kg⁻¹,速效钾 115.3 mg·kg⁻¹。试验田附近建有气象站,2 a 生育期内的日均气温分别为 18.93 °C 和 18.22 °C,2017 年生育期内的降雨总量为 365.0 mm,2018 年为 471.4 mm(图 1)。

1.2 试验设计

试验开始于 2016 年,春玉米供试品种为‘先玉 335’,供试缓释肥(Slow-Release Urea,简称 C)由史丹利公司生产(N:P₂O₅:K₂O 质量比为 28:6:6),其他肥料包括普通尿素(Urea,简称 U,N≥46%)、过磷酸钙(P₂O₅≥16%)、氯化钾(K₂O≥57%),均为质量分数。采用随机区组设计,根据施氮量和配施方式的不同共设置 5 个处理,包括常规施肥量(N 225 kg·hm⁻²)下普通尿素(U)全施(简称 100%U)、常规施肥量(N 225 kg·hm⁻²)下缓释肥(C)和尿素(U)配施(简称 100%CU)、氮肥减量 20%(N 180 kg·hm⁻²)下 U 和 C 配施(简称 80%CU)、氮肥减量 40%(N 135 kg·hm⁻²)下 U 和 C 配施(简称 60%CU)、对照为不施氮肥处理(简称 CK),其中 C 和 U 配施质量比均为 7:3。每个处理 3 次重复,共 15 个小区,小区面积 8.5 m×4 m。玉米行距为 55 cm,株距 25 cm,基本苗为 72 750 株·hm⁻²,施肥方式为一次性基施,同时各处理按照磷肥(P₂O₅ 40 kg·hm⁻²)、钾肥(K₂O 80 kg·hm⁻²)将肥料均匀撒入相应小区,旋耕后铺设地膜,膜际

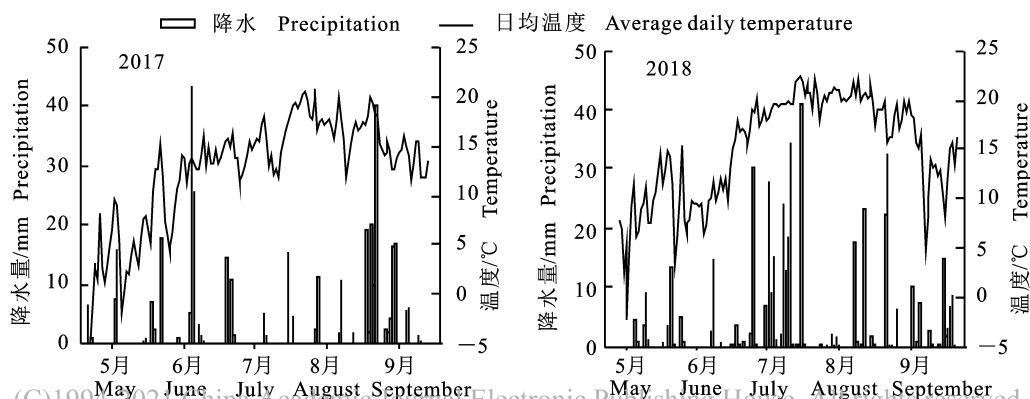


图 1 2017 和 2018 年春玉米生育期降雨量及生育期日平均温度

Fig.1 The average daily temperature and rainfall in 2017 and 2018 growing seasons

种植玉米。2017 年 4 月 20 日播种,9 月 13 日收获;2018 年 4 月 30 日播种,9 月 21 日收获。全生育期无灌溉,根据出苗情况及时进行放苗,适时防除杂草,成熟期及时收获。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 干物质和植株全氮 在玉米苗期、拔节期、大喇叭口期、灌浆期和成熟期采集每个小区代表性植株 3 株,将收获的玉米植株按部位(茎秆、叶片、苞叶、籽粒、穗轴)分开,放入 105 °C 烘箱中杀青 30 min,然后 75 °C 条件下烘干至恒质量,测定其干物质质量,然后烘干粉碎后,用 H₂SO₄-H₂O₂ 法消煮,AA3 流动分析仪测定植物全氮^[27]。

1.3.2 产量及产量构成因素 每个小区连续选取玉米穗 20 个,晒干后,并取 3 个玉米穗测定其行粒数和穗行数,进而计算穗粒数,之后测定其百粒质量,然后进行人工脱粒和称量,测定其中水分质量分数,计算单位面积产量(14%含水量)。

1.3.3 土壤硝态氮和铵态氮 0~80 cm 土层土壤硝态氮和铵态氮质量分数,每 20 cm 一个土层,用 1 mol·L⁻¹ KCl 溶液浸提,AA3 流动分析仪测定^[28]。

1.3.4 籽粒品质 玉米籽粒收获后进行风干,用 DA7250 近红外谷物分析仪对籽粒进行粗蛋白、粗脂肪、淀粉质量分数以及氨基酸的测定。

1.3.5 玉米经济效益 玉米价格采用当年当地玉米的收购价格,不同处理的成本包括肥料投入、劳力投入和农资投入,劳力投入包括播种、放苗、补苗、施肥和覆膜,以及除草、打药和后期收获的劳动力费用。其他投入:包括种子、地膜、农药的购买以及旋地和后期的玉米脱粒的费用。

1.3.6 相关指标计算公式 植株干物质积累量(t·hm⁻²)=单株干物质质量×单位面积的株数

单株各部位氮素积累量(g)=植株各部分干质量×各部分氮素质量分数

植株氮素积累量(kg·hm⁻²)=籽粒干质量×籽粒氮素质量分数+其他器官干质量×其他器官氮素质量分数

氮肥农学效率(kg·kg⁻¹)=(施氮区产量-不施氮区产量)/施氮量

氮肥利用率=(施氮区地上部吸氮量-不施氮地上部吸氮量)/施氮量×100%

氮肥偏生产力(kg·kg⁻¹)=施氮后所获得的籽粒产量/氮肥的投入量

纯利润(元·hm⁻²)=籽粒产量×玉米价格-肥料投入-劳动投入-其他投入

增收=(各处理的纯利润-常规施肥纯利润)/常规施肥纯利润×100%

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2010、SPSS 22.0 软件对数据进行整理和分析,采用 Sigmaplot12.5 软件作图。

2 结果与分析

2.1 春玉米干物质质量以及植株氮素积累量

2017 和 2018 年,随着生育期的延伸,地上部干物质积累量逐渐增加。在苗期,各处理间的干物质积累量差异并不显著;拔节期,不同施氮处理无显著差异,但是都高于不施氮处理;在大喇叭口期、灌浆期和成熟期,100%CU 和 80%CU 的干物质积累量均为最高(表 1)。春玉米单位面积地上部氮素吸收量与干物质的积累量随生育期的变化趋势基本一致。地上部氮素吸收量在苗期到拔节期增长缓慢;在拔节期到灌浆期随生育期呈现快速增长;灌浆-成熟期增速放缓(图 2)。

2.2 春玉米各部位氮素分配

在 2017 和 2018 年收获期,与 CK 相比,各施氮处理的单株氮素积累量显著增加;与 100%U 相比,缓释肥和尿素配施各处理的单株氮素积累量与之没有显著差异(除 2018 年 60%CU)。春玉米各部位的氮吸收量 2 a 内整体表现为籽粒>茎秆、叶片>苞叶、穗轴。施氮处理的单株籽粒氮素吸收量显著高于 CK,2 a 内分别增加了 0.89~1.11 g 和 1.11~1.35 g,而各施氮处理之间没有显著差异。2 a 内,茎秆氮素吸收量在 100%CU、100%U 和 80%CU 之间无显著差异,但是均显著高于 60%CU 和 CK。在 2017 年,叶片中氮素吸收量在各施氮处理间无差异,均高于 CK;2018 年,80%CU 和 60%CU 在叶片中氮素差异不显著,但显著低于 100%U 和 100%CU,同时显著高于 CK。2 a 内,苞叶和穗轴氮素吸收量在不同施氮处理之间无显著差异,但是均显著高于 CK(图 3)。

2.3 土壤硝态氮和铵态氮质量分数

不同施氮处理下,收获期土壤 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 质量分数在 0~80 cm 剖面上呈递减趋势。施氮处理的土壤剖面 NO₃⁻-N 质量分数在 0~80 cm 不同土层均高于 CK,且 100%CU 和 80%CU 的 NO₃⁻-N 质量分数在 2 a 均为最高;而 NH₄⁺-N 在 2 a 各处理之间的差异并不显著(图 4)。

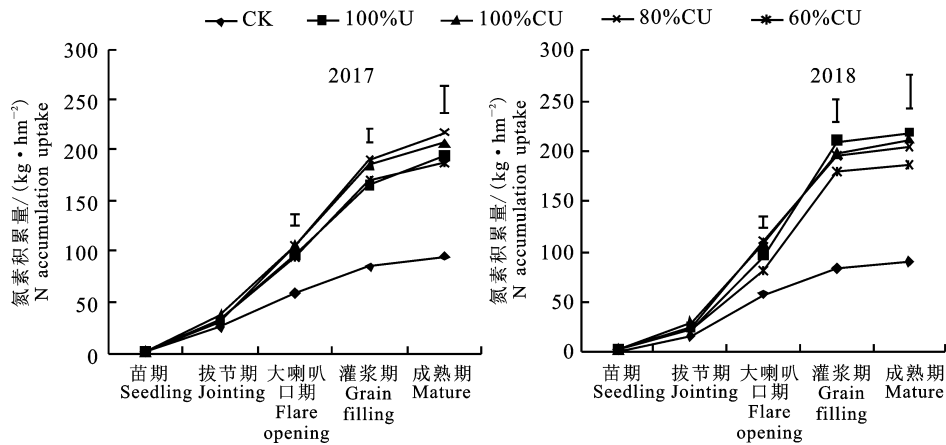
表 1 春玉米不同生育期的干物质积累量

Table 1 The dry accumulation amount of spring maize at different growth stages

年份 Year	处理 Treatment	苗期/ (t · hm ⁻²) Seedling period	拔节期/ (t · hm ⁻²) Jointing period	大喇叭口期/ (t · hm ⁻²) Flare opening period	灌浆期/ (t · hm ⁻²) Grain filling period	成熟期/ (t · hm ⁻²) Mature period
2017	CK	0.06 a	2.32 b	5.91 b	13.67 d	15.30 d
	100%U	0.08 a	2.73 a	5.92 b	19.87 b	21.62 b
	100%CU	0.08 a	2.81 a	8.12 a	20.46 ab	21.86 b
	80%CU	0.07 a	2.43 ab	8.26 a	21.74 a	23.44 a
	60%CU	0.08 a	2.49 ab	7.71 a	17.33 c	18.95 c
2018	CK	0.19 a	1.65 b	5.68 c	9.76 b	11.30 b
	100%U	0.17 a	1.92 ab	7.66 ab	22.24 a	23.42 a
	100%CU	0.16 a	2.22 a	8.30 a	22.51 a	23.88 a
	80%CU	0.20 a	1.97 ab	8.65 a	22.28 a	23.83 a
	60%CU	0.19 a	2.01 a	6.93 b	21.72 a	22.54 a

注: 同列数据后不同小写字母表示处理间在 $P < 0.05$ 水平差异显著。下同。

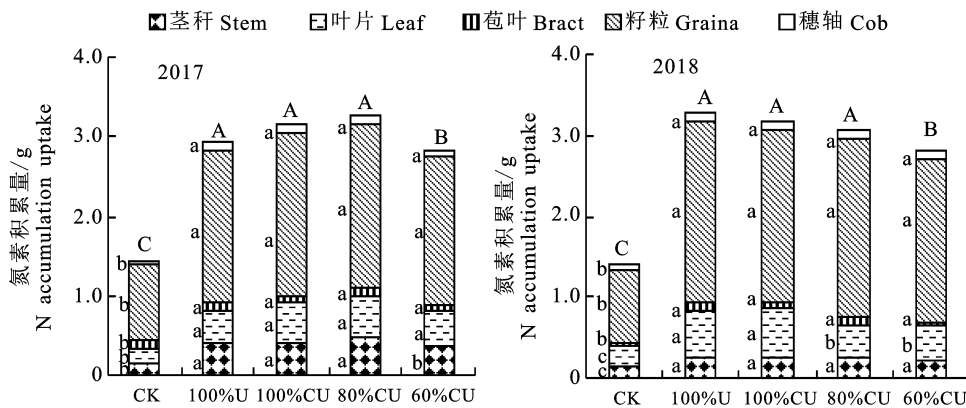
Note: Values followed by different lowercase letters in the same column are significantly different among different treatments at $P < 0.05$ level. The same below.



竖棒代表 LSD 值, $P < 0.05$ Vertical bars represent LSD value, $P < 0.05$

图 2 春玉米生育期内不同施肥处理下玉米植株氮素吸收积累量

Fig.2 Cumulative nitrogen uptake of spring maize in different fertilization treatments

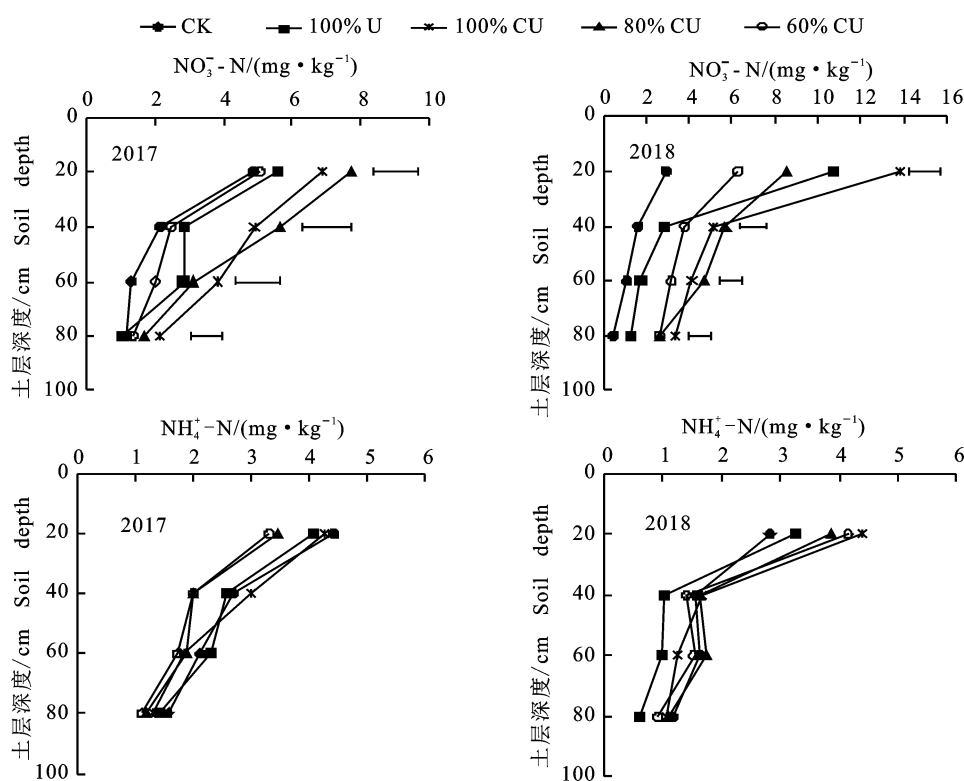


柱形图上不同字母表示处理间差异显著性 ($P < 0.05$), 小写字母对应的植株各部位的氮素差异, 大写字母代表的是单株的氮素差异

Different letters above the bars are significant among different treatments at $P < 0.05$ level, small letter represents the difference in different location of plant, capital letter represents the difference in entire plant

图 3 春玉米植株单株氮素积累量和各部位氮素分配状况

Fig.3 The accumulation of nitrogen per plant and nitrogen distribution in different locations of spring maize



横棒代表 LSD 值 $P < 0.05$ Horizontal bars represent LSD value at 0.05 level

图 4 不同施肥处理下收获期 0~80 cm 土层硝态氮和铵态氮质量分数

Fig.4 Nitrate nitrogen mass fraction and ammonium nitrogen mass fraction of different fertilization treatments in 0—80 cm soil layer at harvest

2.4 玉米产量及产量构成因素、氮素利用效率

2017 和 2018 年,产量在 100%CU、100%U 和 80%CU 之间无显著差异,且显著高于其他处理。其中,80%CU 2 a 的产量均为最高(12 068 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 13 214 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),其次为 100%CU (11 571 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 12 863 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。而 60%CU 的产量显著低于 100%CU、100%U 和 80%CU,但是显著高于 CK。与 CK 相比,施氮显著增加了穗粒数,而在施氮处理间并无差异。80%CU 和 100%CU 的百粒质量高于 100%U,而 60%CU 和 CK 的百粒质量低于 100%U。不同处理中,80%CU 的氮肥农学效率 2 a 里显著高于其他处理,2017 年,100%CU、100%U 和 60%CU 之间无显著差异;2018 年,60%CU 显著低于 80%CU,但要显著高于 100%CU 和 100%U。随着氮肥用量的减少,春玉米的氮肥利用率和氮肥偏生产力都呈现递增的趋势。与 100%U 相比,100%CU 的氮肥利用率和氮肥偏生产力与之都没有差异(表 2)。

2.5 春玉米籽粒品质

2017 和 2018 年,较不施氮处理,施氮显著提高了籽粒蛋白质,2 a 的增幅为 7.00%~12.34% 和 22.07%~32.71%。与 100%U 相比,80%CU 和 100%CU 的粗蛋白质在 2 a 的差异并不显著,但要高于 60%CU 和 CK,CK 的粗蛋白质质量分数最低。CK 的粗脂肪质量分数在 2 a 里均为最高。各处理的粗淀粉在 2017 年的差异并不显著,2018 年 100%U、100%CU 和 80%CU 的粗淀粉显著低于 CK 和 60%CU。2 a 间各施氮处理的赖氨酸质量分数都高于 CK,但在不同施氮处理间并无差异(表 3)。

2.6 春玉米经济效益

2017 和 2018 年,不同处理中 80%CU 2 a 的纯利润都最高,其 2 a 平均纯利润为 11 122 元 $\cdot \text{hm}^{-2}$;其次是 100%U,其 2 a 平均纯利润为 10 933 元 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 。与 100%U 相比,80%CU 的纯利润 2 a 分别增加 3.63% 和 0.37%,而 100%CU 和 60%CU 均造成收益的降低,2 a 分别降低 9.87%、10.99% 和 22.17%、12.87%(表 4)。

表 2 不同施肥处理下玉米产量、产量构成和氮肥利用效率

Table 2 Maize yield components, yield and nitrogen use efficiencies in different fertilization treatments

年份 Year	处理 Treatment	穗粒数 Kernels per ear	百粒质量/g 100-kernel mass	产量/ (kg·hm ⁻²) Kernel yield	氮肥农学效率/ (kg·kg ⁻¹) NAE	氮肥利用率/% NUE	氮肥偏生产力/ (kg·kg ⁻¹) PFPN
2017	CK	476.58 b	29.49 b	8 585 c			
	100%U	589.81 a	32.61 a	11 529 a	13.08 b	40.51 c	51.24 c
	100%CU	586.53 a	33.14 a	11 571 a	13.27 b	49.42 bc	51.43 c
	80%CU	613.47 a	32.68 a	12 068 a	19.35 a	67.94 ab	67.04 b
	60%CU	571.14 a	30.43 b	10 449 b	13.81 b	73.97 a	77.40 a
2018	CK	452.20 b	26.05 c	6 718 c			
	100%U	703.07 a	33.00 ab	12 629 a	26.27 c	57.01 c	56.13 c
	100%CU	682.29 a	34.43 ab	12 863 a	27.31 c	54.06 c	57.17 c
	80%CU	694.26 a	35.20 a	13 214 a	36.09 a	63.78 b	73.41 b
	60%CU	623.61 a	31.64 b	11 062 b	32.18 b	71.33 a	81.94 a

表 3 不同施肥处理下春玉米品质(干基)

Table 3 Quality characteristics of spring maize in different fertilization treatments (dry basis) %

年份 Year	处理 Treatment	粗蛋白 Crude protein	粗脂肪 Crude fat	粗淀粉 Crude starch	赖氨酸 Lysine
2017	CK	8.02 c	4.71 a	75.65 a	0.47 b
	100%U	9.01 a	4.47 ab	75.11 a	0.50 a
	100%CU	8.87 a	4.42 b	75.06 a	0.49 a
	80%CU	8.85 a	4.56 ab	75.24 a	0.49 a
	60%CU	8.58 b	4.71 a	75.37 a	0.50 a
2018	CK	7.52 c	4.07 a	75.75 a	0.34 b
	100%U	9.73 ab	3.59 c	75.39 b	0.41 a
	100%CU	9.94 ab	3.62 c	74.69 c	0.38 ab
	80%CU	9.98 a	3.78 b	75.17 b	0.39 ab
	60%CU	9.18 b	3.84 b	75.92 a	0.41 a

表 4 不同施肥处理下春玉米生产的总收益、投入以及纯利润

Table 4 Total income, input and net profit of spring maize production in different fertilization treatments

年份 Year	处理 Treatment	总收益/ (元·hm ⁻²) Total income	肥料投入/ (元·hm ⁻²) Fertilizer input	劳动投入/ (元·hm ⁻²) Labor input	其他投入/ (元·hm ⁻²) Other input	纯利润/ (元·hm ⁻²) Net profit	增收/% Charge relative to 100%U
2017	CK	14 595	615	6 000	2 850	5 130	-43.97
	100%U	19 599	1 593	6 000	2 850	9 156	0.00
	100%CU	19 671	2 569	6 000	2 850	8 252	-9.87
	80%CU	20 516	2 178	6 000	2 850	9 488	3.63
	60%CU	17 763	1 787	6 000	2 850	7 126	-22.17
2018	CK	12 092	615	6 000	2 850	2 627	-79.33
	100%U	23 153	1 593	6 000	2 850	12 710	0.00
	100%CU	22 732	2 569	6 000	2 850	11 313	-10.99
	80%CU	23 785	2 178	6 000	2 850	12 757	0.37
	60%CU	21 712	1 787	6 000	2 850	11 075	-12.87

注:总收益为玉米产量和玉米价格的乘积。玉米价格为当地的市场收购价格,2 a 分别为 1 700 元·t⁻¹、1 800 元·t⁻¹。肥料投入为单位面积的肥料用量所产生的费用。肥料价格:缓释肥是 3 600 元·t⁻¹,尿素 2 000 元·t⁻¹,磷肥 1 000 元·t⁻¹,钾肥为 2 600 元·t⁻¹。劳动投入和其他投入在材料方法有详细介绍。

Note: The total income is the product of corn yield and corn price. Corn price was calculated basing on the local market price, which is 1 700 yuan·t⁻¹, 1 800 yuan·t⁻¹ respectively in two years. The fertilizer input is the price of the amount of fertilizer per ha. Fertilizer price: slow release fertilizer is 3 600 yuan·t⁻¹, urea 2 000 yuan·t⁻¹, phosphate fertilizer 1 000 yuan·t⁻¹, potash fertilizer 2 600 yuan·t⁻¹. Labor input and other input are detailed in the material method.

3 讨论

在作物的生长过程中,氮素供应的多少会直接影响到作物的产量,合理的氮素运筹是作物高产高效的重要保障^[29]。缓释肥和尿素配施可显著提高作物的氮肥利用率,促进地上部和根系氮积累量和植株总氮吸收量^[30],然而,通过 2 a 的研究结果发现,100%CU 的氮肥农学利用效率、氮肥回收效率、氮肥生产效率与 100%U 相比均无显著差异,这可能是该地区施氮过量的原因。孙晓等^[31]研究发现,与施用尿素 225 kg·km⁻² 相比,施氮量为 180 kg·km⁻² 的缓/控释尿素处理氮肥利用率提高 2.26%~12.69%,本试验发现了相似现象,80%CU 和 60%CU 的氮素利用效率都显著高于 100%U(表 2),说明在氮肥减量下缓释肥的应用能够提高氮素利用效率。土壤中无机氮质量分数是表征土壤肥力的重要指标。与普通氮肥相比,缓释肥能够提高作物生长后期的土壤无机氮质量分数^[32]。本试验结果显示,收获后,100%CU 和 80%CU 的硝态氮质量分数在 2 a 0~80 cm 土层均为最高,这与郭金金等^[21]和孙云保等^[33]在夏玉米中的研究结果相一致,该结果也说明缓释肥和尿素配施有利于增加土壤表层的硝态氮质量分数,促进下一季作物的利用。而铵态氮在各处理中的差异并不显著(图 4),该结果和已有的研究结果相符^[23-34],这可能是由于铵态氮在旱作土壤中不稳定性,且易挥发。

长期以来,伴随着作物产量的提高,氮肥的使用量也在逐年增加,加剧了氮素的损失和环境的污染^[35]。适当的减少氮肥用量不仅不会造成作物减产^[36-37],还能减少氮素的损失^[38],从而在一定程度上减轻环境污染问题。孙云保等^[33]通过连续 4 a 研究发现,控释氮肥减施 30%条件下的作物产量与常规速效肥相比无差异。Zheng 等^[22]在山东地区多年的小麦和玉米的轮作试验中发现,氮肥减量下缓释肥和尿素配施能够改善玉米叶片的功能和促进籽粒充分灌浆,达到小麦和玉米都能增产的效果。本研究结果表明,80%CU 没有造成产量的降低,2 a 均获得了较高的产量(表 2)。该结果也说明在黄土高原地区通过氮肥减量下缓释肥和尿素配施可以提高氮素的利用效率,并保持较高的玉米产量。而减氮 40%虽然提高了氮素利用效率,却造成了作物产量的降低。经济效益是农业生产中要考虑的必要因

素^[39],而较高的收益是农民采用新生产技术的重要驱动力^[40]。从本试验结果来看,2 a 中,100%CU、60%CU 与 100%U 相比,效益是下降的,而 80%CU 的效益均是增加的,同时也有利于减少资源浪费和环境污染(表 4)。因此,从经济效益来讲,氮肥减量 20%下的缓释肥和尿素配施可以作为该地区一种行之有效的施肥措施。

施氮量是影响玉米品质的重要因素^[41],研究发现施氮能够增加玉米籽粒中蛋白质质量分数^[42-43];本研究表明,100%、80%和 60% 3 个施氮水平下玉米籽粒的蛋白质量分数均显著高于 CK。另外,100%CU 和 80%CU 的粗蛋白质量分数和 100%U 无显著差异,但是 60%CU 却显著降低了粗蛋白质量分数,与已有的研究结果一致,籽粒蛋白质质量分数在一定施氮水平下会随施氮量增加而增加^[44-45]。有研究指出缓释肥可以改良作物的品质^[46],而本试验同一施氮水平下,2 a 内 100%U 和 100%CU 之间的粗蛋白、粗脂肪、粗淀粉和赖氨酸质量分数并无显著差异(表 3),说明导致这一结果的原因是当氮素的供应足够多时,缓释肥在改良品质中发挥的作用会被弱化。

4 结论

在黄土高原地区,氮肥减量 20%下缓释肥和尿素 7:3 配施能够提高氮素利用效率,维持较高玉米产量,不会造成籽粒品质的降低,同时还提高了农户的经济效益,可以作为黄土高原地区一种实际可行的施肥措施。

参考文献 Reference:

- [1] LIU Q, CHEN Y, LIU Y, *et al.* Coupling effects of plastic film mulching and urea types on water use efficiency and grain yield of maize in the Loess Plateau, China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 157: 1-10.
- [2] 谢军红, 柴强, 李玲玲, 等. 黄土高原半干旱区不同覆膜连作玉米产量的水分承载时限研究[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(8): 1558-1568.
- [3] XIE J H, CHAI Q, LI L L, *et al.* The time loading limitation of continuous cropping maize yield under different plastic film mulching modes in semi-arid region of Loess Plateau of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(8): 1558-1568.
- [3] LIU J, ZHAN A, CHEN H, *et al.* Response of nitrogen use efficiency and soil nitrate dynamics to soil mulching in dryland maize (*Zea mays* L.) fields[J]. *Nutrient Cycling in*

- Agroecosystems*, 2015, 101(2):1-13.
- [4] LIU X J, JU X T, ZHANG F S, *et al.* Nitrogen dynamics and budgets in a winter wheat-maize cropping system in the North China Plain[J]. *Field Crops Research*, 2003, 83(2): 111-124.
- [5] FERRANT S, DURAND P, JUSTES E, *et al.* Simulating the long term impact of nitrate mitigation scenarios in a pilot study basin[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 124(124):85-96.
- [6] YANG Y, ZHOU C, LI N, *et al.* Effects of conservation tillage practices on ammonia emissions from Loess Plateau rain-fed winter wheat fields[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 104:59-68.
- [7] 陈兴业, 冶林茂, 张 砾. 土壤水分、植物生理与肥料学[M]. 北京: 海洋出版社, 2010: 80.
CHEN X Y, YE L M, ZHANG G. Soil Moisture, Plant Physiology and Fertilizer Science[M]. Beijing: China Ocean Press, 2010: 80.
- [8] 胡廷积, 尹 钧. 小麦生态栽培[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 142.
HU T J, YIN J. Wheat Ecological Cultivation[M]. Beijing: Science Press, 2014: 142.
- [9] 宁堂原, 焦念元, 李增嘉, 等. 施氮水平对不同种植制度下玉米氮素利用及产量和品质的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(12): 2332-2336.
NING T Y, JIAO N Y, LI Z J, *et al.* Effects of N application rate on N utilization, yield and quality of maize under different cropping systems [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(12): 2332-2336.
- [10] LI S X, WANG Z H, HU T T, *et al.* Nitrogen in dryland soils of China and its management[J]. *Advances in Agronomy*, 2009, 101(8): 123-181.
- [11] 巨晓棠, 谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 783-795.
JU X T, GU B J. Status-quo, problem and trend of nitrogen fertilization in China [J]. *Journal of Plant Nutrition & Fertilizer*, 2014, 20(4): 783-795.
- [12] WANG S J, LUO S S, LI X S, *et al.* Effect of split application of nitrogen on nitrous oxide emissions from plastic mulching maize in the semiarid Loess Plateau[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2016, 220: 21-27.
- [13] 葛均筑, 展 茗, 赵 明, 等. 一次性施肥对长江中游春玉米产量及养分利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(5): 1073-1082.
GE J ZH, ZHAN M, ZHAO M, *et al.* Effects of single basal fertilization on yield and nutrient use efficiencies of spring maize in the middle reaches of Yangtze River [J]. *Journal of Plant Nutrition & Fertilizer*, 2013, 19(5): 1073-1082.
- [14] 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 ZH H, WU X B, TAN D SH, *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.
- [15] XIE Y D, YANG X D, CAO Y P, *et al.* Evaluation of determination methods for nutrient release characteristics of coated controlled-release fertilizer under soil and water incubation conditions [J]. *Plant Nutrition & Fertilizer Science*, 2007, 13(3): 491-497.
- [16] GUO J M, WANG Y H, BLAYLOCK A D, *et al.* Mixture of controlled release and normal urea to optimize nitrogen management for high-yielding (15 mg · ha⁻¹) maize [J]. *Field Crops Research*, 2017, 204: 23-30.
- [17] 许仙菊, 马洪波, 宁运旺, 等. 缓释氮肥运筹对稻麦轮作周年作物产量和氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(2): 307-316.
XU X J, MA H B, NING Y W, *et al.* Effects of slow-released nitrogen fertilizers with different application patterns on crop yields and nitrogen fertilizer use efficiency in rice-wheat rotation system [J]. *Journal of Plant Nutrition & Fertilizer*, 2016, 22(2): 307-316.
- [18] 孙旭东, 孙 浒, 董树亭, 等. 包膜尿素施用时期对夏玉米产量和氮素积累特性的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(11): 2179-2188.
SUN X D, SUN H, DONG SH T, *et al.* Effect of coated-urea application times on yield and nitrogen use efficiency of summer maize [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(11): 2179-2188.
- [19] 魏海燕, 李宏亮, 程金秋, 等. 缓释肥类型与运筹对不同穗型水稻产量的影响[J]. 作物学报, 2017, 43(5): 730-740.
WEI H Y, LI H L, CHENG J Q, *et al.* Effects of slow/controlled release fertilizer types and their application regime on yield in rice with different types of panicle [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2017, 43(5): 730-740.
- [20] 侯云鹏, 李 前, 孔丽丽, 等. 不同缓/控释氮肥对春玉米氮素吸收利用、土壤无机氮变化及氮平衡的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(20): 111-123.
HOU Y P, LI Q, KONG L L, *et al.* Effects of different slow/controlled release nitrogen fertilizers on spring maize nitrogen uptake and utilization, soil inorganic nitrogen and nitrogen balance [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(20): 111-123.
- [21] 郭金金, 张富仓, 王海东, 等. 不同施氮量下缓释氮肥与尿素掺混对玉米生长与氮素吸收利用的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(20): 3930-3943.
GUO J J, ZHANG F C, WANG H D, *et al.* Effects of slow-release nitrogen fertilizer and urea blending on maize growth and nitrogen uptake under different nitrogen application rates [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(20): 3930-3943.
- [22] ZHENG W K, ZHANG M, LIU Z G, *et al.* Combining controlled-release urea and normal urea to improve the nitro-

- gen use efficiency and yield under wheat-maize double cropping system[J]. *Field Crops Research*, 2016, 197: 52-62.
- [23] 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 J H, LI Y Y, LIU SH Q, *et al.* Effects of different mixing rates of controlled-release urea and common urea on grain yield and nitrogen use efficiency of spring maize[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46(3): 669-675.
- [24] 衣文平, 朱国梁, 武 良, 等. 不同量的包膜控释尿素与普通尿素配施在夏玉米上的应用研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(6): 1497-1502.
- YI W P, ZHU G L, WU L, *et al.* Application of different release duration controlled-release coated urea combined with conventional urea on summer maize[J]. *Plant Nutrition & Fertilizer Science*, 2010, 16(6): 1497-1502.
- [25] 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.
- LI W, LI X H, TANG SH X, *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 & Water Conservation*, 2011, 25(6): 68-71.
- [26] 张宁宁. 尿素与缓释肥配施对渭北旱塬区春玉米生长的影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- ZHANG N N. The effect of urea application combined with slow-release fertilizer on spring corn in Weibei Dryland [D]. Yangling Shaanxi: Northwest A&F University, 2017.
- [27] 张英利, 许安民, 尚浩博, 等. AA3 型连续流动分析仪测定土壤和植物全氮的方法研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2006, 34(10): 128-132.
- ZHANG Y L, XU A M, SHANG H B, *et al.* Determination study of total nitrogen in soil and plant by continuous flow analytical system[J]. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry(Natural Science Edition)*, 2006, 34(10): 128-132.
- [28] 张英利, 许安民, 尚浩博, 等. 连续流动分析仪测定土壤硝态氮和有效磷的试验及改进[J]. *中国土壤与肥料*, 2008, 26(2): 77-80.
- ZHANG Y L, XU A M, SHANG H B, *et al.* Determination study and improvement of nitrate and available phosphorus in soil by Continuous Flow Analytical System[J]. *Soil & Fertilizer Sciences in China*, 2008, 26(2): 77-80.
- [29] 朱红英, 董树亭, 胡昌浩, 等. 不同控释肥用量对玉米生产效应的影响[J]. *玉米科学*, 2007(2): 114-116.
- ZHU H Y, DONG SH T, HU CH H, *et al.* Study on different dosages of controlled-release fertilizers in influencing the yield and efficiency of maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2007(2): 114-116.
- [30] 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 Y, FENG G ZH, ZHANG T SH, *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.
- [31] 孙 晓, 景建元, 吕慎强, 等. 不同缓/控释尿素在黄土台塬区春玉米的减量施用效果[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(6): 848-855.
- SUN X, JING J Y, LÜ SH Q, *et al.* Effect of different rates of slow/controlled release urea on nitrogen content in spring maize in loess highlands[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(6): 848-855.
- [32] 何 杰, 李 冰, 王昌全, 等. 不同控释氮肥比率对土壤无机氮、微生物及小麦生长的影响[J]. *麦类作物学报*, 2017, 37(3): 349-356.
- HE J, LI B, WANG CH Q, *et al.* Effect of different controlled release nitrogen fertilizer fate on soil inorganic nitrogen, microorganism and wheat growth[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2017, 37(3): 349-356.
- [33] 孙云保, 张 民, 郑文魁, 等. 控释氮肥对小麦—玉米轮作产量和土壤养分状况的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(4): 115-121.
- SUN Y B, ZHANG M, ZHENG W K, *et al.* Effects of controlled release nitrogen fertilizer on yield and soil nutrient regime of wheat-corn rotation system[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(4): 115-121.
- [34] 李世清, 王瑞军, 李紫燕, 等. 半干旱半湿润农田生态系统不可忽视的土壤氮库—土壤剖面中累积的硝态氮[J]. *干旱地区农业研究*, 2004, 22(4): 1-13.
- LI SH Q, WANG R J, LI Z Y, *et al.* Soil nitrogen pool not to be ignored residual $\text{NO}_3\text{-N}$ accumulated in soil profile in semiarid and semihumid agro-ecological system[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2004, 22(4): 1-13.
- [35] CHEN X, CUI Z, FAN M, *et al.* Producing more grain with lower environmental costs[J]. *Nature*, 2014, 514(7523): 486-489.
- [36] 尹彩侠, 李 前, 孔丽丽, 等. 控释氮肥减施对春玉米产量、氮素吸收及转运的影响[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(20): 3941-3950.
- YIN C X, LI Q, KONG L L, *et al.* Effect of reduced controlled-release nitrogen fertilizer application on yield, nitrogen absorption and transportation of spring maize[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(20): 3941-3950.
- [37] 梁 二, 王小彬, 蔡典雄, 等. 不同肥料和 N 减量施用对旱作玉米生产的影响[J]. *中国农业气象*, 2007, 28(4): 371-373.
- LIANG E, WANG X B, CAI D X, *et al.* Influence of reduced fertilization on growth dry land corn and soil nutrition[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2007,

- 28(4):371-373.
- [38] CHEN J N, CAO F B, XIONG H R, *et al.* Effects of single basal application of coated compound fertilizer on yield and nitrogen use efficiency in double-cropped rice [J]. *Crop Journal*, 2017, 5(3): 265-270.
- [39] HOAGLAND L, HODGES L, HELMERS G A, *et al.* Labor availability in an integrated agricultural system [J]. *Journal of Sustainable Agriculture*, 2010, 34(5): 532-548.
- [40] ZHANG W S, LI F M, XIONG Y C, *et al.* Econometric analysis of the determinants of adoption of raising sheep in folds by farmers in the semiarid Loess Plateau of China [J]. *Ecological Economics*, 2012, 74(7): 145-152.
- [41] 阮培均, 马俊, 梅艳, 等. 不同密度与施氮量对玉米品质的影响[J]. 中国农学通报, 2004, 20(6): 147-149.
RUAN P J, MA J, MEI Y, *et al.* Effect of different density and N-application rate on maize quality [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2004, 20(6): 147-149.
- [42] 孙敏, 高志强, 赵维峰, 等. 休闲期深松配施氮肥对旱地土壤水分及小麦籽粒蛋白质积累的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(7): 1286-1295.
SUN M, GAO ZH Q, ZHAO W F, *et al.* Effect of subsoiling in fallow period and nitrogen application on soil moisture and grain protein accumulation in dryland wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(7): 1286-1295.
- [43] 金继运, 何萍, 刘海龙, 等. 氮肥用量对高淀粉玉米和普通玉米吸氮特性及产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(6): 568-573.
JIN J Y, HE P, LIU H L, *et al.* Comparison of nitrogen absorption, yield and quality between high-starch and common corn as affected by nitrogen application [J]. *Plant Nutrition & Fertilizing Science*, 2004, 10(6): 568-573.
- [44] 宋尚有, 王勇, 樊廷录, 等. 氮素营养对黄土高原旱地玉米产量、品质及水分利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(3): 387-392.
SONG SH Y, WANG Y, FAN T L, *et al.* Effect of nitrogen fertilizer on grain yield, quality and water use efficiency of corn in dryland of Loess Plateau [J]. *Plant Nutrition & Fertilizer Science*, 2007, 13(3): 387-392.
- [45] 张学林, 王群, 赵亚丽, 等. 施氮水平和收获时期对夏玉米产量和籽粒品质的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(10): 2565-2572.
ZHANG X L, WANG Q, ZHAO Y L, *et al.* Effects of nitrogen fertilization rate and harvest time on summer maize grain yield and its quality [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(10): 2565-2572.
- [46] YANG Y C, ZHANG M, ZHENG L, *et al.* Controlled release urea improved nitrogen use efficiency, yield, and quality of wheat [J]. *Agronomy Journal*, 2011, 103(2): 479.

Improving Nitrogen Use Efficiencies, Yields and Profits for Spring Maize by Using Mixtures of Slow-release Fertilizer and Normal Urea in Loess Plateau

HU Yingchun¹, HAN Yunliang^{1,2}, SHI Chengxiao^{1,3}, SONG Duanpu¹,
LI Yuze¹, WEN Xiaoxia¹, QIN Xiaoliang¹ and LIAO Yuncheng¹

(1.College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling Shaanxi 712100, China; 2.Zhouzhi Development Service Center of Characteristic Industry, Zhouzhi Shaanxi 710400, China; 3.National S/CRF Engineering Research Center, Kingenda Ecological Engineering Group Co. Ltd., Linshu Shandong 276700, China)

Abstract Aimed at the problem of excessive but inefficient application of nitrogen fertilizer in the arid area in Northwest China, a two-year field experiment was conducted in the southern section of the Loess Plateau to investigate the effects of a mixture of conventional urea (abbreviated as U) and slow-release fertilizer (abbreviated as C) and N application rates on maize biomass, aboveground nitrogen accumulation, soil nitrate nitrogen, soil ammonium nitrogen, nitrogen use efficiencies, yield, kernel quality and economic benefit with semi-film flat covering. The experiment was carried out at Changwu experimental station in 2017 and 2018 with spring maize as the research object. The experiment included five treatments: no N application (CK); the conventional mode with N application rate of 225 kg · hm⁻² (100% U); the combination of U and C with N application rate of 225 kg · hm⁻² (100% CU); the combination of U and C with N application rate of 180 kg · hm⁻² (80% CU); the combination of U and C with N application rate of 135 kg · hm⁻² (60% CU). The above three treatments had the same C : U ratio of 7 : 3. The result showed that compared with 225 kg · hm⁻² N application

rate, the N using efficiency (NUE) and partial factor productivity of applied (NFPF) in 80%CU and 60%CU were significantly improved. Compared with 100%U, the NO_3^- -N mass fraction of 100%CU and 80%CU is significantly higher in the harvest period. Furthermore, 80%CU has no significant difference in dry matter, nitrogen accumulation or grain quality compared with conventional fertilization. In different treatments, the highest grain yield was achieved in the treatment of 80%CU, and it was no significant difference in comparison with the treatments of 100%U and 100%CU in two years, but significantly higher than 60%CU. Moreover, 80%CU obtained the highest net profit among all treatments, with a two-year average of $11\,222 \text{ yuan} \cdot \text{hm}^{-2}$, which was $189 \text{ yuan} \cdot \text{hm}^{-2}$ higher than 100%U. The results demonstrate that a moderate amount ($180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) of the mixture of slow-release and normal urea is recommended for greater net revenue and nitrogen use efficiencies in Loess Plateau.

Key words Loess Plateau; Spring maize; Slow-release fertilizer; Yield; Nitrogen use efficiency

Received 2019-03-18 **Returned** 2019-04-25

Foundation item The Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest (No. 201503121); the National Natural Science Foundation of China (No. 31701384); Shaanxi Science Technology Innovation Project Plan (No. 2016KTCL02-08); China Postdoctoral Fund (No. 2017M623258).

First author HU Yingchun, male, master student. Research area: efficient farming system. E-mail: 839151270@qq.com

Corresponding author LIAO Yuncheng, male, Ph.D, professor. Research area: agro-ecology and efficient farming system. E-mail: yunchengliao@163.com

QIN Xiaoliang, male, Ph.D, associate professor. Research area: efficient utilization of water and fertilizer in arid area. E-mail: xiaoliangqin2006@163.com

(责任编辑: 成 敏 **Responsible editor: CHENG Min**)