

# 不同缓控释氮肥对连作春玉米产量及氮肥去向的影响

解文艳<sup>1</sup>, 周怀平<sup>1</sup>, 杨振兴<sup>1</sup>, 白雪<sup>2</sup>, 杜艳玲<sup>2</sup>

(1. 山西省农业科学院农业环境与资源研究所, 太原 030031; 2. 山西大学生物工程学院, 太原 030006)

**摘要:** 在山西省连作春玉米区连续4年设置大田定位试验, 设置不施氮肥(CK)、一次性基施尿素(CU1)、追施尿素(CU2)、树脂包膜尿素(PCU)、硫包衣尿素(SCU)、多酶金缓释尿素(MEU)6个施肥处理, 研究施用缓控释氮肥对春玉米产量、氮肥去向及氮素平衡的影响, 为春玉米氮素养分的科学管理技术提供参考。结果表明: (1) 缓控释氮肥处理能够明显提高春玉米产量, 促进氮素吸收。与CU1处理相比, SCU、MEU、PCU和CU2处理可分别提高春玉米产量17.51%、9.88%、9.62%、9.48%, 同时氮肥农学利用效率分别提高7.5、4.2、4.1、4.1 kg/kg。(2) 不同缓控释氮肥处理的作物吸收肥料氮以及肥料氮在0—100 cm土层残留量之间存在显著差异。SCU、MEU、PCU、CU2和CU1的氮肥表观利用率分别为36.1%、32.5%、26.5%、26.7%、19.5%, 肥料氮在0—100 cm土层残留量分别占施氮量的28.5%、31.6%、35.7%、35.5%、39.1%。此外, 与一次性基施尿素相比, 缓控释氮肥能够显著降低肥料氮的损失, SCU、MEU、PCU和CU2分别降低了22.65%、18.81%、8.99%、8.47%。(3) 综合分析不同氮肥处理的农田氮素平衡, SCU处理的春玉米吸氮量最高, 为261.5 kg/hm<sup>2</sup>, 其次是MEU, 为253.5 kg/hm<sup>2</sup>。SCU的0—100 cm土层残留量在缓控释氮肥中最低, 为124.1 kg/hm<sup>2</sup>, MEU和PCU分别为131.04、140.09 kg/hm<sup>2</sup>。SCU处理的氮表观损失量最低, 为106.3 kg/hm<sup>2</sup>, MEU和PCU分别为111.6、125.1 kg/hm<sup>2</sup>。在山西省春玉米主产区土壤上, 缓控释氮肥能够显著促进春玉米对氮素的吸收, 减少氮素损失。硫包衣尿素和多酶金缓释尿素的效果相对较好。

**关键词:** 玉米连作; 缓控释氮肥; 产量; 氮肥去向; 氮素平衡

中图分类号: S145.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)03-0207-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.03.031

## Effects of Different Slow Controlled-Release Fertilizers on Grain Yield and Nitrogen Fate in Continuous Spring Maize Production

XIE Wenyan<sup>1</sup>, ZHOU Huaiping<sup>1</sup>, YANG Zhenxing<sup>1</sup>, BAI Xue<sup>2</sup>, DU Yanling<sup>2</sup>

(1. Institute of Agricultural Environment and Resources, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan 030031; 2. College of Biological Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006)

**Abstract:** A field positioning experiment was conducted in spring maize continuous cropping area of Shanxi Province for four consecutive years, which included six fertilization treatments: No application of nitrogen fertilizer (CK), one-time basal application of urea (CU1), topdressing of urea (CU2), resin coated urea (PCU), sulfur coated urea (SCU) and multi-enzyme gold sustained-release urea (MEU). It was set up to study the effects of slow controlled release nitrogen fertilizers on spring maize yield, consumption of nitrogen fertilizer and nitrogen balance to provide reference for scientific management technology of spring maize nitrogen nutrition. The results showed that: (1) Slow controlled release nitrogen fertilizer treatment could significantly increase spring maize yield and promote nitrogen uptake. Compared with CU1, SCU, MEU, PCU and CU2 increased the yield of spring maize by 17.51%, 9.88%, 9.62% and 9.48%, respectively, while the agricultural utilization efficiency of nitrogen fertilizer was increased by 7.5, 4.2, 4.1 and 4.1 kg/kg, respectively. (2) There were significant differences in the uptake of fertilizer nitrogen by crops and the residual amount of fertilizer nitrogen in 0—100 cm soil layer with different fertilizers. Apparent use efficiency of nitrogen of SCU, MEU, PCU, CU2 and CU1 were 36.1%, 32.5%, 26.5%, 26.7% and 19.5%, respectively. Residual fertilizer nitrogen in 0—100 cm soil layer accounted for 28.5%, 31.6%, 35.7%, 35.5% and 39.1% of the nitrogen application, respectively. Additionally, compared with one-off urea application, slow controlled release nitrogen fertilizer could significantly reduce the loss of fertilizer nitrogen, by 22.65%, 18.81%, 8.99% and 8.47% for SCU, MEU, PCU and CU2 respectively. (3) Comprehensive analysis of nitrogen balance in different treatments

收稿日期: 2018-11-24

资助项目: 山西省重点研发计划项目(201703D221008-1, 201703D211002-3, 201603D2110-5); 山西省农业科学院博士研究基金项目(YBSIJ1615)

第一作者: 解文艳(1978—), 女, 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

showed that the SCU had the highest nitrogen uptake, 261.5 kg/hm<sup>2</sup>, followed by MEU, 253.5 kg/hm<sup>2</sup>. The residues amount in 0—100 cm soil layer in SCU was the lowest among the slow controlled release nitrogen fertilizer treatments, 124.1 kg/hm<sup>2</sup>, and 131.04 kg/hm<sup>2</sup> for MEU and 140.09 kg/hm<sup>2</sup> for PCU. The apparent loss of nitrogen in SCU was the lowest, 106.3 kg/hm<sup>2</sup>, and 111.6 kg/hm<sup>2</sup> for MEU and 125.1 kg/hm<sup>2</sup> for PCU. In the soil of main spring maize producing areas in Shanxi Province, slow controlled release nitrogen fertilizer could significantly promote the absorption of nitrogen and reduce nitrogen loss. Sulfur coated urea and multi-enzyme gold sustained-release urea have relatively good effects.

**Keywords:** continuous spring maize; slow controlled-release nitrogen fertilizer; yield; fate of N; balance of N

氮是玉米生长发育所必需的营养元素<sup>[1]</sup>。近年来,中国农用氮肥施用量不断增加,因此如何在保证“氮肥零增长”的情况下保障粮食安全,提高氮肥利用效率,并通过减少氮素损失来降低肥料的环境效应是中国农业发展的大方向之一<sup>[2]</sup>。因此,合理施用氮肥对于提高玉米产量、氮肥利用率、减轻环境压力具有重要意义<sup>[3]</sup>。而氮肥的合理施用除了要确定适宜的氮肥用量外,还应注重肥料的施用时期和形态<sup>[4]</sup>。在玉米常规施肥中,为了保证玉米高产,需在玉米生长的开花期和灌浆期追施氮肥,这样不仅导致费力费工、增加成本,而且还会因玉米生长期高温多雨,使肥料淋失,造成浪费,增加环境压力<sup>[5]</sup>。近年来,利用多种调控机制使养分按照设定的释放速率和周期缓慢或控制释放、以满足作物在一定生长季内对养分需求的缓控释肥得到了快速发展和应用,为现代作物生产简化施肥、降低施肥劳动强度、提高肥料利用率提供了可能<sup>[6-8]</sup>。现有的缓控释肥大体可分为物理型缓控释肥(各种包膜肥料)和化学型缓释肥(养分释放抑制型肥料、阻溶型肥料及化学合成类肥料等)等类型<sup>[9]</sup>。不同类型缓控释肥其养分释放规律有差异<sup>[10]</sup>,对不同作物的生长发育有着不同的影响。魏海燕等<sup>[11]</sup>研究表明,缓释肥类型对不同穗型水稻产量呈现脲甲醛>树脂包衣缓控释肥>硫包衣缓控释肥。周丽平等<sup>[2]</sup>研究表明,在华北地区中低产田,氮肥缓释化处理能够显著促进夏玉米对氮素的吸收,减少氮素损失,提高夏玉米产量。郑沛等<sup>[12]</sup>研究表明,硫膜和树脂膜控释尿素均能提高小麦产量及其构成,硫膜和树脂膜控释尿素在调控耕层土壤无机氮(硝态氮和铵态氮)形态上分别在小麦生育前期和后期表现最佳。马忠明等<sup>[13]</sup>在旱砂田西瓜上的研究表明,缓控释肥较常规施肥处理可使西瓜增产 34%,品质和肥料利用率也显著提高。由于缓控释氮肥因控释原理、制造工艺、土壤条件、地域差异及作物生长发育的不同,不同类型缓控释氮肥的肥效在不同地区差异很大。因此,应根据作物种类、栽培模式及气候、土壤等环境条件合理选用缓控释肥类型。为此,本研究选择了生产中应用较广、具代表性的 3 种缓控释氮肥,在等量施氮条件下,旨在明确缓控释氮肥在山西省春玉米主产区

应用效果及对氮肥去向(作物吸收、土壤残留以及氮肥损失)的影响,以期为山西省春玉米主产区选择合理的缓控释氮肥、提高春玉米氮肥利用率、降低氮肥损失提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验为大田长期定位试验,始于 2014 年,在山西省晋中市榆次区东阳镇山西省农业科学院东阳试验基地(37°33'21" N,112°40'02" E)进行,该区域属温带大陆性气候,海拔 800 m,年平均气温为 9.7 °C,年均降水量 440.7 mm,主要集中在 7—8 月,年均日照时间 2 662 h 左右,无霜期 158 d。种植制度为一年一作。

### 1.2 试验材料

供试肥料分别为普通尿素(含氮量 46.0%,中国石油天然气股份有限公司)、树脂包膜尿素(含氮量 44.0%,领先生物农业股份有限公司)、硫包衣尿素(含氮量 37.0%,汉枫缓释肥料有限公司)、多酶金缓释尿素(含氮量 46.2%,中农集团控股股份有限公司),磷肥为过磷酸钙(含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 量 16%,云南祥丰化肥股份有限公司),钾肥为氯化钾(含 K<sub>2</sub>O 60%,浙江浙农爱普贸易有限公司)。

试验区土壤类型为潮土,土壤质地为中壤。0—20 cm 土层土壤有机质含量 16.89 g/kg,全氮 1.12 g/kg,有效磷 17.97 mg/kg,速效钾 229.25 mg/kg,硝态氮 18.6 mg/kg,pH 8.4。

供试作物为春玉米,品种为“大丰 30”。

### 1.3 试验方法

1.3.1 试验设计 进行连续 4 年大田长期定位试验,试验设置 6 个处理:不施氮(CK),普通尿素 1(CU1,100%播前基施);普通尿素 2(CU2,50%播前基施+50%追肥);树脂包膜尿素(PCU);硫包衣尿素(SCU);多酶金缓释尿素(MEU)。每个处理 3 次重复,小区面积 6 m×11 m,共 18 个小区,随机区组设计。施肥量:氮肥(N)、磷肥(以 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 计)、钾肥(以 K<sub>2</sub>O 计)用量分别为 225,90,90 kg/hm<sup>2</sup>。除普通尿素 2 处理,各处理均为一次性基施,施肥深度 10~15 cm,撒施后旋耕。试验播种日期为每年的 4 月下旬,

种植密度为 6.6 万株/hm<sup>2</sup>。6 月下旬拔节期,采用沟施覆土方法追肥,施肥深度 10~15 cm,距离作物根系 10~15 cm,收获日期为每年的 10 月上旬。其他田间管理按大田常规方法进行,无灌溉。

1.3.2 样品采集与测定 在玉米收获期选择 3 株有代表性的植株,分秸秆和穗分别装入网袋带回实验室,烘干后全部粉碎。采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-混合加速剂消解,用全自动蒸氮仪 FOSS-Kjeltec8400 测定全氮含量。在播种玉米前和玉米收获期采集 0—300 cm 土层样品,每层 20 cm。用 2 mol/L KCl 进行振荡提取,用全自动间断化学分析仪(SMART CHEM 200, 法国)测定土壤无机氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)含量。

1.3.3 产量及产量结构的测定 在玉米成熟期,将试验小区全部收获,并调查穗长、穗粗、穗行数、行粒数、穗粒数和百粒重等产量构成因子。

#### 1.4 数据统计与分析方法

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

参考巨晓棠等<sup>[14]</sup>的方法计算参数:

氮肥表观利用率(NUE,%)=(施氮区作物吸氮量—不施氮区作物吸氮量)/施氮量×100%

氮肥农学效率(ANUE, kg/kg)=(施氮区产量—不施氮区产量)/施氮量

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

生育期土壤氮素净矿化量(kg/hm<sup>2</sup>)=不施氮区作物吸氮量+不施氮区土壤无机氮残留量—不施氮区土壤起始无机氮累积量

生育期土壤氮素表观损失量(kg/hm<sup>2</sup>)=(生育期施氮量+土壤起始无机氮累积量+生育期土壤氮素净矿化量)—(作物携出量+收获后土壤无机氮残留量)

氮素盈余量(kg/hm<sup>2</sup>)=氮素表观损失量+收获后土壤无机氮残留量

氮肥表观残留率(%)=(施氮区土壤无机氮残留量—不施氮区土壤无机氮残留量)/施氮量×100%

氮肥表观损失率(%)=100%—氮肥表观利用率—氮肥表观残留率

作物吸收肥料氮(kg/hm<sup>2</sup>)=施氮区地上部吸氮量—不施氮区地上部吸氮量

作物吸收肥料氮的比例(NUFF,%)=作物吸收肥料氮/施氮区地上部吸氮量×100%

肥料氮残留量(kg/hm<sup>2</sup>)=施氮区 0—100 cm 土层土壤残留 N<sub>min</sub>—不施氮区 0—100 cm 土层土壤残留 N<sub>min</sub>

肥料氮残留率(%)=肥料氮残留量/施氮区 0—100 cm 土层土壤残留 N<sub>min</sub>×100%

肥料氮总损失量(kg/hm<sup>2</sup>)=施氮量—作物吸收肥料氮—肥料氮残留量

## 2 结果与分析

### 2.1 不同缓控释氮肥对春玉米产量的影响

由表 1 可知,不同缓控释处理的氮肥较尿素处理增产效果显著。与 100%播前基施普通尿素(CU1)处理相比,硫包衣尿素(SCU)的增产幅度最大,4 年平均增产达 17.51%,多酶金缓释尿素(MEU)、树脂包膜尿素(PCU)平均分别增产 9.88%、9.62%;50%追施普通尿素(CU2)增产 9.48%。可见,与尿素一次性全施相比,缓控释氮肥及追施氮肥有助于春玉米获得高产。施氮处理与不施氮对照相比,硫包衣尿素、多酶金缓释尿素、树脂包膜尿素、50%追施普通尿素和 100%播前基施普通尿素平均增产率分别为 32.90%、24.28%、23.98%、23.83%、13.10%。

表 1 不同缓控释氮肥处理对玉米产量的影响

年份	项目	CK	CU1	CU2	PCU	SCU	MEU
2014	产量/(t·hm <sup>-2</sup> )	9.09d	10.07c	11.09b	10.95b	11.82a	10.98b
	增产率/%		10.78	22.05	20.41	30.03	20.79
2015	产量/(t·hm <sup>-2</sup> )	7.29c	8.06b	8.73ab	8.62b	9.05a	8.73ab
	增产率/%		10.56	19.69	18.24	24.14	19.71
2016	产量/(t·hm <sup>-2</sup> )	8.29d	9.54c	10.51b	10.68b	11.74a	10.49b
	增产率/%		15.05	26.75	28.86	41.66	26.59
2017	产量/(t·hm <sup>-2</sup> )	9.60d	11.09c	12.11b	12.24b	12.93a	12.39b
	增产率/%		15.53	26.12	27.50	34.71	29.06
累积	产量/(t·hm <sup>-2</sup> )	34.27	38.76	42.44	42.49	45.55	42.59
	增产率/%		13.10	23.83	23.98	32.90	24.28
				9.48	9.62	17.51	9.88

注:同行数据后不同小写字母表示相同年份不同缓控释氮肥处理下差异达 5%显著水平。

## 2.2 不同缓控释氮肥对春玉米氮素利用状况的影响

2.2.1 收获期吸氮量 春玉米成熟期地上部干物质质量和氮素吸收量在不同年份、不同试验处理间存在显著差异(表 2)。4 年平均数据显示,硫包衣尿素处理的干物质量最高,达 24.6 t/hm<sup>2</sup>,较不施氮肥(CK)处理提高 32.58%(6.0 t/hm<sup>2</sup>),较 100%播前基施普通尿素(CU1)处理提高 17.85%(3.7 t/hm<sup>2</sup>)。各处理 4 年平均地上部干物质量大小顺序为硫包衣尿素>多酶金缓释尿素>50%追施普通尿素>树脂包膜尿素>100%播前基施普通尿素。2014—2016 年,各处理

表 2 不同缓控释氮肥处理对春玉米地上部干物质量和氮素吸收量的影响

处理	干物质量/(t·hm <sup>-2</sup> )				氮素吸收量/(kg·hm <sup>-2</sup> )			
	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年
CK	19.6d	15.9d	18.1d	20.7d	188.4d	157.2d	185.3c	190.2d
CU1	22.0c	17.3c	20.4c	23.9c	229.7c	195.9c	221.8b	249.0c
CU2	24.0b	19.1b	22.5b	26.0b	242.4b	210.7b	231.8b	276.3b
PCU	23.2b	19.3b	23.0b	25.8b	240.9b	204.2c	242.7b	271.6b
SCU	25.0a	20.2a	25.3a	28.1a	257.2a	226.1b	262.5a	300.3a
MEU	24.0b	19.5b	22.6b	26.8b	253.8a	216.6b	254.4a	289.0b

注:同列数据后不同小写字母表示相同年份不同缓控释氮肥处理下差异达 5%显著水平。下同。

2.2.2 氮肥利用效率 由表 3 可知,4 个年度不同缓控释氮肥处理下的氮素利用效率有明显的差异。与 100%播前基施普通尿素相比,硫包衣尿素的氮肥农学利用效率为最高,4 年平均提高了 7.5 kg/kg,多酶金缓释尿素、树脂包膜尿素和 50%追施普通尿素的氮肥农学利用效率 4 年平均提高了 4.2,4.1,4.1 kg/kg。肥料贡献率即肥料对作物产量的贡献率,表

表 3 不同缓控释氮肥处理对春玉米氮肥利用率的影响

处理	氮肥农学效率/(kg·kg <sup>-1</sup> )				氮肥贡献率/%			
	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年
CU1	4.4c	3.4d	5.5c	6.6d	9.7c	9.6d	13.1c	13.4d
CU2	8.9b	6.4b	9.9b	11.1b	18.1b	16.5b	21.1b	20.7c
PCU	8.2b	5.9c	10.6b	11.7b	17.0b	15.4c	22.4b	21.6bc
SCU	12.1a	7.8a	15.4a	14.8a	23.1a	19.4a	29.4a	25.8a
MEU	8.4b	6.4b	9.8b	12.4b	17.2b	16.5b	21.0b	22.5b

## 2.3 化肥氮的去向

比较 2014—2017 年各氮肥处理下化肥氮在春玉米季去向(表 4)可知,作物吸收肥料氮和肥料氮在 0—100 cm 土层残留量均存在明显差异。各氮肥处理下,硫包衣尿素处理的玉米吸收的肥料氮在 4 年内均为最高,平均高达 30.8%,多酶金缓释尿素、50%追施普通尿素、树脂包膜尿素和 100%播前基施普通尿素处理下,玉米吸收的肥料氮平均为 28.6%,24.7%,24.6%,19.5%。这表明与 100%播前基施普通尿素处理相比,缓释化处理的氮肥能够促进玉米对肥料氮的吸收,其中硫包衣尿素的促进作用最为明显。100%播前基施普通尿素、50%追施普通尿素、树脂包膜尿素、多酶金缓释尿素和硫包衣尿素处理的肥

之间地上部总吸氮量的大小顺序均为硫包衣尿素>多酶金缓释尿素>50%追施普通尿素>树脂包膜尿素>100%播前基施普通尿素。2017 年,各处理之间地上部总吸氮量的大小顺序依次为硫包衣尿素>多酶金缓释尿素>树脂包膜尿素>50%追施普通尿素>100%播前基施普通尿素。硫包衣尿素的地上部吸氮量 4 年平均为最高,高达 261.5 kg/hm<sup>2</sup>。4 年结果平均来看,与普通尿素一次性全施相比,硫包衣尿素、多酶金缓释尿素、50%追施普通尿素和树脂包膜尿素的地上部吸氮量平均提高了 16.70%,13.11%,7.23%,7.03%。

明年投入肥料生产能力的指标<sup>[15]</sup>。与 100%播前基施普通尿素相比,硫包衣尿素、多酶金缓释尿素和树脂包膜尿素的氮肥贡献率 4 年平均增加 112.42%,67.82%,65.96%,说明缓控释尿素能提高氮肥贡献率从而提高氮素利用率。50%追施普通尿素的氮肥贡献率也显著高于 100%播前基施普通尿素,4 年平均增加 65.94%。

料氮 0—100 cm 土层残留率平均为 60.0%,57.9%,57.8%,55.1%,52.6%。施入农田中的肥料氮除了被作物吸收和残留于土壤中外,有一部分也以氯化物进入环境中,造成肥料氮损失。与 100%播前基施普通尿素相比,氮肥缓释化处理能够减少肥料氮的损失,硫包衣尿素、多酶金缓释尿素、50%追施普通尿素和树脂包膜尿素平均分别降低了 15.2%,14.1%,9.7%,8.5%。

## 2.4 不同缓控释氮肥对春玉米连作周期内土壤—作物系统氮素平衡的影响

从 4 季玉米连作的土壤—作物系统氮素平衡状况来看(表 5),氮素输入方式以施用氮肥为主,占施氮处理氮素总输入量的 58.9%,而氮素矿化量和播前土壤无机氮量分别占 30.8%和 10.3%。氮素输出

项中,作物吸收带走氮素为主要方式,平均占氮素总输出量的63.8%(58.6%~68.4%)。氮素盈余中,各处理土壤无机氮残留量和表观损失在4年里均存在差异,其中,硫包衣尿素处理由于大部分氮素被作物吸收利用,其无机氮残留量为最低,氮素表观损失也最低,最终氮素表观盈余最少。4季玉米连作后,各处理的土壤无机氮残留量大小顺序依次为100%播前基施普通尿素>50%追施普通尿素>树脂包膜

尿素>多酶金缓释尿素>硫包衣尿素,氮素表观损失量大小顺序依次为100%播前基施普通尿素>树脂包膜尿素>50%追施普通尿素>多酶金缓释尿素>硫包衣尿素。四年平均来看,与100%播前基施普通尿素处理相比,树脂包膜尿素、50%追施普通尿素、多酶金缓释尿素和硫包衣尿素处理的氮素表观盈余分别下降63.0(9.96%),64.8(10.24%),117.5(18.57%),149.7 kg/hm<sup>2</sup>(23.66%)。

表4 控释氮肥在春玉米季的去向

年份	处理	玉米吸收肥料氮		肥料氮土壤0—100 cm 残留		肥料氮总损失	
		N/(kg·hm <sup>-2</sup> )	比例/%	N/(kg·hm <sup>-2</sup> )	比例/%	N/(kg·hm <sup>-2</sup> )	比例/%
2014	CU1	41.3c	18.0	71.9a	46.1	111.8a	36.0
	CU2	54.0b	22.3	64.6bc	43.4	106.4b	34.3
	PCU	52.5b	21.8	68.0b	44.7	104.5b	33.5
	SCU	68.8a	26.7	57.7d	40.7	98.5c	32.6
	MEU	65.4a	25.8	60.8c	41.9	98.8c	32.3
2015	CU1	38.7d	19.8	96.9a	59.5	89.4a	20.8
	CU2	53.5b	25.4	89.7b	57.6	81.8c	17.0
	PCU	47.0c	23.0	94.2a	58.8	83.7bc	18.2
	SCU	68.9a	30.5	78.7cd	54.4	77.5d	15.2
	MEU	59.4b	27.4	80.7c	55.0	84.9b	17.6
2016	CU1	36.5e	16.5	92.2a	64.7	96.3a	18.9
	CU2	46.5d	20.1	82.8b	62.2	95.7a	17.7
	PCU	57.4c	23.7	85.9b	63.1	81.7b	13.3
	SCU	77.2a	29.4	64.0d	56.0	83.8b	14.6
	MEU	69.1b	27.2	73.1c	59.2	82.8b	13.6
2017	CU1	58.8d	23.6	90.7a	69.9	75.5a	6.5
	CU2	86.1c	31.2	82.0b	67.8	56.9c	1.1
	PCU	81.4c	30.0	72.7c	65.1	70.9b	4.9
	SCU	110.1a	36.7	56.5d	59.2	58.4c	4.2
	MEU	98.8b	34.2	70.1c	64.3	56.0c	1.5

## 2.5 不同缓控释氮肥对春玉米连作周期内氮肥表观利用、残留和损失的影响

2014—2017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6)表明,缓控释氮肥施用显著提高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。4年连作体系中,硫包衣尿素处理的氮肥表观利用率平均高达36.1%,多酶金缓释尿素、树脂包膜尿素、50%追施普通尿素和100%播前基施普通尿素的氮肥表观利用率平均为32.5%,26.5%,26.7%,19.5%。与100%播前基施普通尿素相比,硫包衣尿素、多酶金缓释尿素、树脂包膜尿素和50%追施普通尿素氮肥表观利用率平均提高了16.6,13.0,7.0,7.2个百分点。4年平均来看,与100%播前基施普通尿素处理相比,硫包衣尿素、多酶金缓释尿素、树脂包膜尿素和50%追施普通尿素的氮肥表观残留率分别降低了10.6,7.5,3.4,3.6个百分点,氮肥表观损失率分别降低了6.2,5.7,3.6,3.6个百分点。

## 3 讨论

### 3.1 缓控释氮肥对春玉米产量和氮素利用的影响

缓控释氮肥能够明显提高玉米的产量,改善玉米的氮素利用状况。孙晓等<sup>[16]</sup>研究表明,与普通尿素一次性基施相比,缓/控释氮肥显著提高玉米产量和氮肥利用率;在等氮(N 180 kg/hm<sup>2</sup>)条件下,各缓控释尿素处理与基施普通尿素相比,产量显著提高17.4%~29.3%,氮肥利用率显著增加4.49%~17.08%。郑雨等<sup>[17]</sup>的研究表明,100%控释氮肥基施与100%普通速效氮肥基施比较,平均增产5.1%,玉米地上部氮素吸收总量平均增加6.6%,氮肥表观利用率平均提高2.4个百分点。本研究表明,硫包衣尿素、多酶金缓释尿素、树脂包膜尿素与普通尿素相比均能提高玉米产量,且差异显著。其中,硫包衣尿素处理的增产效果最为明显,其次为多酶金缓释尿素和树脂包膜尿素处理。这是因为,在收获期硫包衣尿素处理的地上部吸氮量在4年中均较高,因此,硫包衣尿素能够促进玉米对氮素的吸收和转化。这也是硫包衣处理

玉米具有较高产量的原因之一。且硫包衣尿素的氮缓释尿素,平均达 32.5%,高于中国氮肥表观利用率表观利用率最高,平均高达 36.1%,其次为多酶金的平均水平 31.3%<sup>[18]</sup>。

表 5 不同缓控释氮肥对春玉米连作周期内土壤—作物系统氮素平衡的影响

单位:kg/hm<sup>2</sup>

项目		CK	CU1	CU2	PCU	SCU	MEU
第 1 季(2014 年)	施氮量	0	225	225	225	225	225
	播前土壤无机氮量	158.1	158.1	158.1	158.1	158.1	158.1
	氮输入	114.5	114.5	114.5	114.5	114.5	114.5
	氮矿化量	114.5	114.5	114.5	114.5	114.5	114.5
第 1 季(2014 年)	总输入量	272.6	497.6	497.6	497.6	497.6	497.6
	作物吸收	188.4d	229.7c	242.4b	240.9b	257.2a	253.8a
	土壤无机氮残留量	84.2d	156.1a	148.8ab	152.2a	141.9c	145.0b
	氮输出	0	111.8a	106.4b	104.5b	98.5c	98.8c
第 2 季(2015 年)	施氮量	0	225	225	225	225	225
	播前土壤无机氮量	126.4	170.5	165.8	166.2	148.5	145.5
	氮输入	96.8	96.8	96.8	96.8	96.8	96.8
	氮矿化量	96.8	96.8	96.8	96.8	96.8	96.8
第 2 季(2015 年)	总输入量	223.2	492.3	487.6	488.0	470.3	467.3
	作物吸收	157.2d	195.9c	210.7b	204.2c	226.1b	216.6b
	土壤无机氮残留量	66.0d	162.9a	155.7b	160.2a	144.7c	146.7c
	氮输出	0.0	133.5a	121.2b	123.5b	99.6c	104.0c
第 3 季(2016 年)	施氮量	0	225	225	225	225	225
	播前土壤无机氮量	111.3	184.9	183.5	177.1	165.8	172.2
	氮输入	124.3	124.3	124.3	124.3	124.3	124.3
	氮矿化量	124.3	124.3	124.3	124.3	124.3	124.3
第 3 季(2016 年)	总输入量	235.6	534.2	532.9	526.4	515.1	521.5
	作物吸收	185.3c	221.8b	231.8b	242.7b	262.5a	254.4a
	土壤无机氮残留量	50.3d	142.5a	133.2b	136.2b	114.3c	123.4c
	氮输出	0.0	169.9a	167.9a	147.5b	138.3c	143.7b
第 4 季(2017 年)	施氮量	0	225	225	225	225	225
	播前土壤无机氮量	94.0	153.0	144.7	147.9	124.4	137.7
	氮输入	135.3	135.3	135.3	135.3	135.3	135.3
	氮矿化量	135.3	135.3	135.3	135.3	135.3	135.3
第 4 季(2017 年)	总输入量	229.3	513.3	505.0	508.2	484.7	498.0
	作物吸收	190.2d	249.0c	276.3b	271.6b	300.3a	289.0b
	土壤无机氮残留量	39.0d	129.7a	121.0a	111.7b	95.5c	109.1b
	氮输出	0	134.6	107.8	124.9	88.9	99.9
4 季(2014—2017 年)	施氮量	0	900	900	900	900	900
	播前土壤无机氮量	158.1	158.1	158.1	158.1	158.1	158.1
	氮输入	470.9	470.9	470.9	470.9	470.9	470.9
	氮矿化量	470.9	470.9	470.9	470.9	470.9	470.9
4 季(2014—2017 年)	总输入量	629.0	1529.0	1529.0	1529.0	1529.0	1529.0
	作物吸收	721.1	896.4	961.2	959.4	1046.1	1013.9
	土壤无机氮残留量	39.0	129.7	121.0	111.7	95.5	109.1
	氮输出	-131.1	502.9	446.8	457.9	387.4	406.0
4 季(2014—2017 年)	施氮量	0	900	900	900	900	900
	氮盈余	-92.1	632.6	567.8	569.6	482.9	515.1

注:同行数据后不同小写字母表示相同年份不同缓控释氮肥处理下差异达 5%显著水平。

表 6 2014—2017 年不同缓控释氮肥处理氮肥表观利用、残留和损失率

单位:%

处理	氮肥表观利用率				氮肥表观残留率				氮肥表观损失率			
	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年
CU1	18.4c	17.2d	16.2d	26.1d	32.0a	43.1a	41.0a	40.3a	49.7a	39.7a	42.8a	33.6a
CU2	24.0b	23.8bc	20.7c	38.3c	28.7b	39.9b	36.8b	36.4a	47.3ab	36.4ab	42.5a	25.3b
PCU	23.3b	20.9c	25.5c	36.2c	30.2ab	41.9ab	38.2ab	32.3b	46.4b	37.2a	36.3b	31.5a
SCU	30.6a	30.6a	34.3a	48.9a	25.7c	35.0c	28.5d	25.1d	43.8b	34.4b	37.2b	25.9b
MEU	29.1a	26.4ab	30.7ab	43.9b	27.0bc	35.9c	32.5c	31.2b	43.9b	37.7a	36.8b	24.9b

注:同列数据后不同小写字母表示相同年份不同缓控释氮肥处理下差异达 5%显著水平。

硫包衣尿素的氮肥农学利用效率在各处理中为最高,与其他处理之间存在显著性差异,这说明其能够促进玉米对养分的运转储运。另外,硫包衣尿素处理的玉米吸收的肥料氮平均达 30.8%,高于多酶金缓释尿素和树脂包膜尿素处理,多酶金缓释尿素和树脂包膜尿素处理平均为 28.6%和 24.6%。这可能与硫包衣尿素的控释机理有关,树脂、硫包衣控释肥是将包膜材料直接在颗粒尿素表面缩合成膜状物<sup>[19]</sup>,其养分释放影响因素主要有调节成膜的物质组成、膜的厚度和温度,多酶金缓释尿素是在多酶金尿素中添加了 0.2%的脲酶抑制剂 NBPT。本研究通过静态水溶法测定微分溶出率和氮素累积溶出率排列顺序为树脂包膜尿素>多酶金缓释尿素>硫包衣尿素,树脂包膜尿素 84 天内的溶出速率明显快于其他 2 种肥料,且达到 80%累积氮素释放率的天数明显早于其他 2 种肥料,约为 44 天左右;而硫包衣尿素在 84 天内的氮素累积溶出率未达到 80%。因此,硫包衣尿素能更好的通过调节养分释放与作物吸收之间的关系,使玉米产量和氮肥利用率达到最高。

### 3.2 缓控释氮肥对氮去向和农田氮素平衡的影响

氮肥施入土壤—作物体系后的基本去向主要包括 3 个方面:一是被作物吸收,二是在土壤剖面以无机氮形态或有机结合形态残留,三是以氨挥发、硝化—反硝化、淋洗或径流等各种途径损失至环境<sup>[14]</sup>。因此,除了产量、经济效益和品质等指标,施肥后植物—土壤系统的氮素平衡状况和氮素去向也应作为评价一项施肥技术措施优劣的重要依据<sup>[20]</sup>。

据巨晓棠等<sup>[21]</sup>估算,中国旱作生产中氮肥的损失率在 45%左右。中国北方地区种植生育期一般与雨季同步,传统氮素管理模式下速效氮素的大量投入导致氮素流失和淋失严重,戴明宏等<sup>[22]</sup>在春玉米上的研究表明,习惯施肥(普通尿素 240 N kg/hm<sup>2</sup> 分次施用)的氮肥表观损失率为 42.6%。本研究显示,4 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为 41.5%,施用缓控释氮肥处理能够明显降低氮肥表观损失率,硫包衣尿素处理降低效果更明显,较普通尿素处理下降 6.2 个百分点,其次为多酶金缓释尿素和树脂包膜尿素。

土壤无机氮残留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<sup>[23]</sup>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<sup>2</sup>,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<sup>2</sup>。本研究中,相比尿素一次性全施处理,缓控释氮肥处理可以降低土壤中的无机氮残留量。缓控释氮肥处理 4 个生长季土壤无机氮残留量主要分布

在 95.5~160.2 kg/hm<sup>2</sup>,总体上均处于较合适水平。硫包衣尿素处理的土壤无机氮残留量为最低,4 季连作春玉米后为 95.5 kg/hm<sup>2</sup>。因此,从土壤—植物系统氮素平衡的观点看,缓控释氮肥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。

缓控释氮肥施用效果受多方面因素影响,如作物的养分需求特性、气候状况、土壤条件等,其中,以气候因素的影响最为强烈。本研究虽评估了各缓控释氮肥的肥料效应以及氮素平衡状况,但是未引入不同氮肥与环境气候因子之间相互影响的研究,因此可加强土壤—作物—大气之间综合调控的相关研究,以更好地为农业可持续性发展服务。

## 4 结论

缓控释氮肥施用能够明显提高春玉米产量,促进氮素吸收并减少氮素残留,与尿素一次性基施相比,硫包衣尿素、多酶金缓释尿素、树脂包膜尿素和 50%追施尿素处理的春玉米平均增产 17.51%,9.88%,9.62%,9.48%,地上部吸氮量分别提高了 16.70%,13.11%,7.03%,7.23%。氮素残留分别降低了 16.02%,11.33%,5.21%,5.49%,农田氮素损失分别降低了 22.65%,18.81%,8.99%,8.47%。综合分析春玉米对各肥料的吸收量,以及各种肥料的土壤残留量及损失量可知,硫包衣尿素和多酶金缓释尿素的肥料效应相对较好,能够更好地满足可持续农业的需求,服务于山西省农业生产。

### 参考文献:

- [1] 姬景红,李玉影,刘双全,等.控释尿素对春玉米产量、氮效率及氮素平衡的影响[J].农业资源与环境学报,2017,34(2):153-160.
- [2] 周丽平,杨俐苹,自由路,等.夏玉米施用不同缓释化处理氮肥的效果及氮肥去向[J].中国农业科学,2018,51(8):1527-1536.
- [3] Mosisa W, Marianne B, Gunda S, et al. Nitrogen uptake and utilization in contrasting nitrogen efficient tropical maize hybrids [J]. Crop Science, 2007, 47(2): 519-528.
- [4] 薛高峰,张贵龙,孙焱鑫,等.包膜控释尿素(追施)对冬小麦生长发育及土壤硝态氮含量的影响[J].农业环境科学学报,2012,31(2):377-384.
- [5] 卢艳丽,自由路,王磊,等.华北小麦—玉米轮作区缓控释肥应用效果分析[J].植物营养与肥料学报,2011,17(1):209-215.
- [6] 衣文平,孙哲,武良,等.包膜控释尿素与普通尿素配施对冬小麦生长发育及土壤硝态氮的影响[J].应用生态学报,2011,22(3):687-693.
- [7] 杜君,孙克刚,张云红,等.控释尿素对水稻生理特性、氮肥利用率及土壤硝态氮含量的影响[J].农业资源与环境学报,2016,33(2):134-141.

- [8] 徐明岗,李菊香,李东初,等.控释氮肥对双季水稻生长及氮肥利用率的影响[J].植物营养与肥料学报,2009,15(5):1010-1015.
- [9] 陈剑秋.几种新型缓控释肥工艺及养分释放特征研究[D].山东泰安:山东农业大学,2012.
- [10] 王晓巍,蒯佳林,刘晓静,等.4种缓控释氮肥在不同环境条件下的养分释放特性的研究[J].草地学报,2013,21(2):332-337.
- [11] 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.
- [12] 郑沛,宋付朋,马富亮.硫膜与树脂膜控释尿素对小麦不同生育时期土壤氮素的调控及其产量效应[J].水土保持学报,2014,28(4):122-127.
- [13] 马忠明,杜少平,薛亮,等.NPK养分配比与NAM长效剂对旱砂田西瓜生长、品质和养分利用的影响[J].核农学报,2013,27(3):358-364.
- [14] 巨晓棠,刘学军,张福锁.冬小麦与夏玉米轮作体系中氮肥效应及氮素平衡研究[J].中国农业科学,2002,35(11):1361-1368.
- [15] 冯国忠,王寅,焉莉,等.土壤类型和施氮量对连作春玉米产量及氮素平衡的影响[J].土壤学报,2017,54(2):444-455.
- [16] 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.
- [17] 郑雨,李玉影,韩晓日,等.控释氮肥对东北春玉米产量及土壤-作物体系内氮素平衡的影响[J].玉米科学,2017,25(4):117-122,128.
- [18] 张福锁,王激清,张卫峰,等.中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J].土壤学报,2008,45(5):915-924.
- [19] 樊小林,刘芳,廖照源,等.我国控释肥料研究的现状和展望[J].植物营养与肥料学报,2009,15(2):463-473.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.

(上接第 198 页)

- [12] Huang M B, He F H, Yang X M, et al. Effect of apple production base on regional water cycle in Weibei upland of the Loess Plateau [J]. Journal of Geographical Sciences, 2001, 11(2): 239-243.
- [13] 张义,谢永生,郝明德.黄土高原沟壑区塬面苹果园土壤水分特征分析[J].土壤,2011,43(2):293-298.
- [14] Sun C F, Ma Y Y. Effects of non-linear temperature and precipitation trends on Loess Plateau droughts [J]. Quaternary International, 2015, 372: 175-179.
- [15] Jia X X, Shao M A, Zhu Y J, et al. Soil moisture decline due to afforestation across the Loess Plateau, China [J]. Journal of Hydrology, 2017, 546: 113-122.
- [16] Zhang Z Q, Li M, Si B C, et al. Deep rooted apple trees decrease groundwater recharge in the highland region of the Loess Plateau, China [J]. Science of the Total Environment, 2017, 622/623: 584-593.
- [17] 李青华,张静,王力,等.黄土丘陵沟壑区山地苹果林土壤干化及养分变异特征[J].土壤学报,2018,55(2):503-514.
- [18] Liu M X, Xu X L, Sun A Y. New drought index indicators that land surface changes might have enhanced drying tendencies over the Loess Plateau [J]. Ecological Indicators, 2018, 89: 716-724.
- [19] Liu Y, Miao H T, Huang Z, et al. Soil water depletion patterns of artificial species and ages on the Loess Plateau (China) [J]. Forest Ecology and Management, 2018, 417: 137-143.
- [20] 白盛元,汪有科,马建鹏,等.黄土高原半干旱区降雨入渗试验研究[J].干旱地区农业研究,2016,34(2):218-223.
- [21] 刘蕾.中国玉米根系生物量及空间分布特征[D].北京:中国农业大学,2016.
- [22] Song X L, Gao X D, Dyck M, et al. Soil water and root distribution of apple tree (*Malus pumila* Mill) stands in relation to stand age and rainwater collection and infiltration system (RWCI) in a hilly region of the Loess Plateau, China [J]. Catena, 2018, 170: 324-334.
- [23] Wang G L, Chen X P, Cui Z L, et al. Estimated reactive nitrogen losses for intensive maize production in China [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2014, 197: 293-300.
- [24] Yang X L, Lu Y L, Tong Y A, et al. A 5-year lysimeter monitoring of nitrate leaching from wheat-maize rotation system: Comparison between optimum N fertilization and conventional farmer N fertilization [J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2015, 199: 34-42.
- [25] Wang L, Burke S P. A catchment-scale method to simulating the impact of historical nitrate loading from agricultural land on the nitrate-concentration trends in the sandstone aquifers in the Eden Valley, UK [J]. Science of the Total Environment, 2017, 579: 133-148.