

DOI: 10.11766/trxb202003100702

高永祥, 李若尘, 张民, 周洪印, 郑文魁, 陈德清, 刘之广. 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]. 土壤学报, 2021, 58(6): 1507–1519.

GAO Yongxiang, LI Ruochen, ZHANG Min, ZHOU Hongyin, ZHENG Wenkui, CHEN Deqing, LIU Zhiguang. Effects of Straw Returning Combined with Application of Mixture of Controlled-Release Urea and Common Urea on Maize Yield and Soil Fertility[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(6): 1507–1519.

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*

高永祥¹, 李若尘¹, 张民^{1,2}, 周洪印¹, 郑文魁¹, 陈德清², 刘之广^{1,2†}

(1. 土肥资源高效利用国家工程实验室, 山东农业大学资源与环境学院, 山东泰安 271018; 2. 养分资源高效开发与综合利用国家重点实验室, 金正大生态工程集团股份有限公司, 山东临沭 276700)

摘要: 探讨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, 为其科学合理配伍提供依据。2014—2018 年开展了控释掺混尿素(硫加树脂包膜尿素: 树脂包膜尿素: 普通尿素为 3.5: 3.5: 3)应用于夏玉米(*Zea mays* L., 郑单 958)的田间长期定位试验。试验设 6 个处理: 1) 不施氮且秸秆不还田处理(CK1); 2) 不施氮但秸秆还田处理(CK2); 3) 普通尿素但秸秆不还田处理(BBF1); 4) 普通尿素且秸秆还田处理(BBF2); 5) 控释掺混尿素但秸秆不还田处理(CRF1); 6) 控释掺混尿素且秸秆还田处理(CRF2)。成熟期测定叶面积指数(LAI)和叶片叶绿素相对含量测定值(SPAD), 调查玉米产量和产量构成, 同时取 0~20 cm 土壤样品测定相关土壤肥力状况。结果表明: 1) BBF2 相比 BBF1 处理, 5 年平均玉米产量和氮素累积利用率显著提高 5.9%和 13.3%; CRF2、CRF1 相比 BBF2 处理玉米 5 年平均产量分别显著提高 12.0%和 4.2%, 氮素累积利用率分别显著提高 57.3%和 42.4%; 2) 较 2013 年基础土壤, 2018 年玉米收获季 CRF2、BBF2、CRF1 和 BBF1 处理土壤有机质含量分别提高 33.5%、25.9%、19.5%和 11.4%, 全氮含量分别提高 26.6%、18.6%、9.9%和 7.0%; 3) 秸秆还田的 CRF2、BBF2 较同类肥料秸秆不还田的 CRF1、BBF1 处理, 土壤有机质含量分别显著提高 11.8%、13.0%, 全氮含量分别显著提高 15.2%、10.9%; 4) 较 BBF1 处理, CRF1 处理的土壤硝态氮、铵态氮、有效磷和速效钾分别显著提高 52.0%、18.6%、19.5%和 24.7%; 秸秆长期还田进一步提高了土壤养分含量, CRF2 土壤硝态氮、铵态氮、有效磷和速效钾含量分别显著提高 66.3%、25.2%、47.5%和 30.4%。本试验条件下, 秸秆还田配施控释掺混尿素可协同增效, 显著提高土壤肥力、玉米产量、氮素累积利用率和净收益。

关键词: 长期定位试验; 氮素累积利用率; 一次性施肥; 小麦玉米轮作

中图分类号: S158.2 文献标志码: A

Effects of Straw Returning Combined with Application of Mixture of Controlled-Release Urea and Common Urea on Maize Yield and Soil Fertility

* 国家重点研发计划项目课题(2017YFD0200706)、山东省重点研发计划项目(2019GNC106011)和山东省研究生导师指导能力提升项目(SDYY18108)共同资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFD0200706), the Key Research and Development Program of Shandong Province of China (No. 2019GNC106011) and the Graduate Tutor Ability Improvement Project of Shandong Province of China (No. SDYY18108)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: liuzhiguang8235126@126.com

作者简介: 高永祥(1996—), 男, 山东青岛人, 硕士研究生, 主要从事土肥资源高效利用研究。E-mail: 17863804917@163.com

收稿日期: 2020-03-10; 收到修改稿日期: 2020-07-25; 网络首发日期(www.cnki.net): 2020-10-20

GAO Yongxiang¹, LI Ruochen¹, ZHANG Min^{1, 2}, ZHOU Hongyin¹, ZHENG Wenkui¹, CHEN Deqing², LIU Zhiguang^{1, 2†}

(1. National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018, China; 2. State Key Laboratory of Nutrition Resources Integrated Utilization, Kingenta Ecological Engineering Group Co., Linshu, Shandong 276700, China)

Abstract: 【 Objective 】 Effects of straw returning coupled with application of the mixture of controlled-release urea(CRU) and common urea on maize yield and soil fertility were investigated, in an attempt to provide a scientific basis for rationalizing the application. 【 Method 】 A long-term field experiment from 2014 to 2018 was conducted to investigate effects of application of the mixture fertilizer consisting of sulfur and polymer-coated urea, polymer coated urea, and normal urea at a ratio of 3.5: 3.5: 3 in terms of N to summer maize (*Zea mays* L., Zhengdan 958) on yield. The experiment was designed to have six treatments: 1) No nitrogen applied or straw returning (CK1); 2) No nitrogen applied in addition to straw returning (CK2); 3) Common urea applied only (BBF1); 4) Common urea applied in addition to straw returning(BBF2); 5) Application of the mixture only (CRF1); and 6) Mixture applied in addition to straw returning (CRF2). At the mature stage, soil samples were collected from the 0-20 cm soil layer of each plot for analysis, and LAI, SPAD, yield and yield composition of the maize were measured. 【 Result 】 Results show that: 1) Treatment BBF2 was 5.9% and 13.3% higher than Treatment BBF1 in 5-year mean of grain yield and accumulative N use efficiency (ANUE), respectively, and Treatment CRF2 and CRF1 was 12.0% and 4.2% higher in maize yield, and 57.3% and 42.4% higher in accumulative N use efficiency, respectively, than Treatment BBF2; 2) The soil samples collected from Treatments CRF2、BBF2、CRF1 and BBF1 at the maize harvest stage in 2018 were 33.5%, 25.9%, 19.5% and 11.4%, respectively, higher in soil organic matter content, 26.6%, 18.6%, 9.9% and 7.0%, respectively, higher in soil total nitrogen content than their respective samples collected in 2013; 3) Treatment CRF2 and BBF2 was 11.8% and 13.0% higher in soil organic matter content, 15.2% and 10.9%, higher in total nitrogen content, respectively, than Treatment CRF1 and BBF1; 4) Treatment CRF1 was 52.0%, 18.6%, 19.5% and 24.7% higher in soil NO_3^- -N, NH_4^+ -N, available phosphorus and available potassium content, respectively, than Treatment BBF1, indicating that straw returning further increased soil nutrient content. Treatment CRF2 was 66.3%, 25.2%, 47.5% and 30.4%, higher, respectively, in soil NO_3^- -N, NH_4^+ -N, available phosphorus and available potassium content than Treatment BBF1. 【 Conclusion 】 All the findings demonstrate that long-term application of the mixture of urea fertilizers coupled with straw returning can significantly improve maize yield, ANUE, net income and soil fertility due to their synergistic interactions.

Key words: Long-term experiment; Accumulative N use efficiency; Single fertilization; Wheat and corn rotation

中国是秸秆资源最为丰富的国家之一，焚烧是我国传统的作物秸秆处理方式。秸秆大量焚烧导致其作为可利用资源的比重下降，间接弱化了土壤保水保肥能力，造成了环境污染和经济损失^[1]。秸秆还田是经济可持续的秸秆资源高效利用方式之一，可减少焚烧产生的温室气体。秸秆丰富的有机物质经土壤微生物腐解能够培肥土壤^[2]，还田秸秆自身的碳氮比(C/N)是影响腐解速率的重要因子^[3]。适宜微生物活动的C/N一般为20~25:1^[4]，禾本科作物秸秆的C/N通常为65~85:1，小麦、玉米秸秆还田后会造土壤碳氮比过高，因此会出现微生物消耗土壤养分与作物争氮的现象，易造成作物前期缺肥，进而影响产量^[5]。

秸秆还田后土壤的碳氮比是决定微生物固持氮素的关键因素^[6]，添加氮肥可提供秸秆腐解所需氮源，加速腐解，保障苗期养分需求，增加根系生物量及分泌物，提高作物产量^[7]。袁嫚嫚等^[8]发现秸秆还田配施尿素，较单施尿素处理显著提高水稻-油菜轮作年均产量17.5%~28.6%。然而普通尿素一次性基施无法满足秸秆持续分解所需氮素及作物中后期养分需求，仍需多次追施，费工费时，且存在氮素挥发、淋溶、径流等风险。控释尿素可调控氮素养分释放速率，显著提高肥料利用效率，减少化肥用量和施肥次数，省工省力，配施还田秸秆可显著提高小麦、玉米年平均产量8.22%~15.06%^[9]。但全量控释尿素在作物苗期养分释放缓慢，无法有效降

低秸秆还田后土壤 C/N, 可能会影响作物氮素吸收, 且过高成本限制了其推广应用^[10]。

将普通尿素和控释尿素按照一定比例混合后制得控释掺混尿素, 其中的普通尿素能保障玉米苗期氮素需求, 控释尿素能满足玉米中后期养分需求, 有利于作物增产^[11], 然而控释掺混尿素配施秸秆还田对夏玉米增产增效的研究鲜有报道。且以往秸秆还田研究中的还田秸秆量均为人为控制定量投入, 未充分考虑长期累积的有机物料投入数量差异。通过 5 年小麦玉米轮作田间定位试验, 探讨 9 季秸秆还田条件下, 控释掺混尿素处理对土壤肥力和玉米产量的影响, 为秸秆合理还田和控释掺混尿素高效施用提供技术参考。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

2014—2018 年在山东省泰安市山东农业大学土肥资源高效利用国家工程实验室南校区中试基地 (36°09'14" N, 117°09'01" E) 进行了连续 5 年的定位试验。供试土壤类型为棕壤, 在“中国土壤系统分类”(CST, 2001) 中为普通筒育湿润淋溶土 (Typic Hapli-Udic Argosols), 土壤质地为砂质壤土 (含砂粒 569.7 g·kg⁻¹, 黏粒 119.8 g·kg⁻¹, 粉粒 310.5 g·kg⁻¹)。耕层土壤基础性质为 pH7.28 (土水比 1: 2.5), 有机质含量 11.40 g·kg⁻¹, 全氮 0.78 g·kg⁻¹, NO₃⁻-N 10.7 mg·kg⁻¹, NH₄⁺-N 7.8 mg·kg⁻¹, 有效磷 39.2 mg·kg⁻¹, 速效钾 75.7 mg·kg⁻¹。

供试肥料包括树脂包膜控释尿素 (PCU, N 430 g·kg⁻¹, 释放期 3 个月)、硫加树脂包膜控释尿素 (PSCU, N 350 g·kg⁻¹, 释放期 3 个月)、普通尿素 (N 460 g·kg⁻¹)、过磷酸钙 (P₂O₅ 160 g·kg⁻¹)、磷酸二铵 (N 180 g·kg⁻¹, P₂O₅ 460 g·kg⁻¹)、氯化钾 (K₂O 600 g·kg⁻¹)。控释掺混尿素由 PCU、PSCU、普通尿素按 3.5: 3.5: 3 进行掺混制得, 其控释氮释放呈 S 型 (图 1)。供试玉米品种为“郑单 958”, 生育期约 103 d。

1.2 试验设计

试验共设 6 个处理: (1) CK1, 不施氮肥且秸秆不还田处理; (2) CK2, 不施氮肥但秸秆还田处理; (3) BBF1, 普通尿素但秸秆不还田处理; (4) BBF2, 普通尿素且秸秆还田处理; (5) CRF1, 控

释掺混尿素但秸秆不还田处理; (6) CRF2, 控释掺混尿素且秸秆还田处理, 每个处理重复 3 次。控释掺混尿素处理中控释氮占总氮量的 70%, 其中 PCU 和 PSCU 各占 35%, 速效氮占 30%, 均作为基肥一次性施入; 普通尿素处理的氮肥 60% 基施, 40% 于拔节期追肥; 小麦季 N-P₂O₅-K₂O 用量按照 150-150-75 kg·hm⁻² 施入; 玉米季 N-P₂O₅-K₂O 用量按照 150-75-150 kg·hm⁻² 施入。本研究中秸秆还田处理为小麦、玉米秸秆均还田, 秸秆不还田处理仅玉米秸秆不还田。小麦秸秆粗纤维较玉米秸秆少, 且在高温潮湿环境下更易腐熟, 而玉米秸秆含水量高, 粉碎还田难, 且粗纤维较多不易腐化^[12], 故当地农民习惯仅小麦秸秆还田、玉米秸秆不还田。

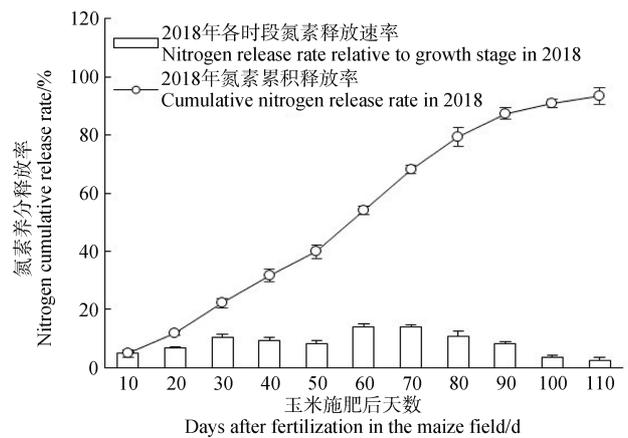


图 1 控释尿素在玉米田土壤中的养分释放特征

Fig. 1 Dynamics of N release from controlled release urea in maize field

试验小区面积为 16 m² (4 m × 4 m), 随机排列。为防各小区之间水分和肥料相互渗透的影响, 各小区由厚 80 mm、埋深 1 m 的水泥板围四周隔开。种植玉米 7 行, 行距约 60 cm, 株距 20 cm。种子埋深 5 cm, 肥料条施埋深 10~15 cm, 距种子行 10 cm。玉米种子行和肥料行数比为 1: 1。

玉米季于播种后、抽穗期和灌浆期采用农民习惯田间管理措施。作物收获后, 还田处理的秸秆经人工粉碎后撒施于地表, 并通过小型旋耕机将秸秆与 20 cm 土壤混匀。

1.3 样品采集

2018 年玉米成熟期 (施肥后 112 d) 分别采集植株和土壤样品。各小区的玉米全部实收, 然后用脱粒机将籽粒与玉米芯分离并进行烘干, 按照入库

含水量 ($140.0 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 折算产量^[13], 穗粒数随机选取 10 个玉米果穗记录行数及行粒数。秸秆及籽粒置于烘箱 105°C 杀青 15 min, 然后转至 65°C 烘箱烘干至恒重, 其后称重磨细待测。采集 0~20 cm 的土壤样品, 自然风干后研磨分别过 2 mm 筛和 0.25 mm 筛后, 测定土壤理化性质。

1.4 样品测定方法

作物叶片叶绿素相对含量 (SPAD) 值采用叶绿素仪 (SPAD-502, Minolta, 日本) 在各小区随机选取 5 株玉米测定最上部的完全展开叶叶缘和叶脉之间进行测定; 叶面积指数 (LAI) 通过植物冠层分析仪 (LAI-2200, LI-COR, 美国) 测定; 全氮含量采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 联合消煮, 凯氏定氮法测定。土壤有机质采用 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 和浓 H_2SO_4 加热法测定; 有效磷含量用 $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$ (pH 8.5) 浸提—钼锑抗比色法测定; 速效钾含量用 $1.0 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ NH}_4\text{OAc}$ (pH 7.0) 浸提—火焰光度法测定^[14]; $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量采用 $0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$ 浸提 (土水比 1:10) 后, 用连续流动注射分析仪 (AA3, Bran-Luebbe, 德国) 测定。

1.5 数据分析方法

氮肥累积利用率、氮肥累积农学利用率和氮肥偏生产力指标的计算方法^[15]:

氮肥累积利用率/% = (试验开始到某年施氮处理作物氮累积吸收量 - 试验开始到某年不施氮处理作物氮累积吸收量) / 累积施入氮量 $\times 100$;

氮肥累积农学利用率/ ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$) = (试验开始到某年施氮区累积籽粒产量 - 试验开始到某年不施氮区累积籽粒产量) / 累积施入氮量;

氮肥偏生产力/ ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$) = 施氮区产量 / 施氮区施入氮量。

数据处理与统计分析通过 Excel 2016 和 SAS 8.2 完成, 包括单因素方差分析 (One-way ANOVA) 及邓肯法 (Duncan) 差异显著性检验, 比较不同处理间在 $P < 0.05$ 的显著性水平, 并采用 Excel 2016 软件作图。

2 结果

2.1 秸秆还田配施控释掺混尿素对秸秆还田生物量及其带入养分量的影响

2014—2018 年, 秸秆还田条件下, 不同施肥处理 5 年期间带入土壤的 $\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}$ 量有显著差异 (表 1), 秸秆还田的 CRF2 和 BBF2 处理带入土壤中的 $\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}$ 量分别为 $599.7\text{-}321.1\text{-}1\ 195 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $480.6\text{-}278.4\text{-}1\ 105 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; 秸秆不还田的 CRF1 和 BBF1 处理带入土壤中的 $\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}$ 量分别为 $224.0\text{-}96.9\text{-}470.5 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $198.8\text{-}90.5\text{-}377.2 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。因此, 秸秆还田控释掺混尿素 CRF2 处理较不还田控释掺混尿素 CRF1 处理带入土壤中的 $\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}$ 增加量为 $375.7\text{-}224.2\text{-}724.1 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; 秸秆还田普通

表 1 秸秆还田生物量及秸秆还田带入氮磷钾量

Table 1 Biomass of the straw returned and input of nitrogen, phosphorus and potassium with the straw returned

处理 Treatment	秸秆还田生物量 Biomass of the straw returned/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)					还田秸秆带入土壤中的纯氮量 Total amount of N returned from straw/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)						
	2014	2015	2016	2017	2018	5 年累积 5-years Accumulation					5 年累积 5-years Accumulation	
						2014	2015	2016	2017	2018	2014	2015
CK1	5 942f	6 698d	6 165e	6 463f	5 830c	31 098f	22.7e	20.9f	23.5e	24.7f	22.3c	114.1f
CK2	14 444c	15 711b	16 560c	15 330c	5 372c	67 417c	67.3c	66.7c	77.6c	76.0c	21.0c	308.6c
BBF1	8 444e	8 802c	11 416d	8 093e	9 882b	46 638e	34.6d	43.3e	47.0d	33.3e	40.7b	198.8e
BBF2	20 588b	23 860a	25 165b	22 693b	9 584b	101 890b	97.3b	119.2b	117.1b	108.2b	38.6b	480.6b
CRF1	9 236d	10 542c	12 002d	9 386d	10 771a	51 937d	37.0d	50.5d	48.0d	37.6d	51.0a	224.0d
CRF2	21 578a	26 099a	27 706a	24 547a	11 180a	111 110a	115.4a	145.8a	148.9a	142.9a	46.7a	599.7a

续表

处理 Treatment	还田秸秆带入土壤中的 P ₂ O ₅ 量					还田秸秆带入土壤中的 K ₂ O 量									
	Total amount of P ₂ O ₅ returned from straw/ (kg·hm ⁻²)					Total amount of K ₂ O returned from straw/ (kg·hm ⁻²)									
						5 年累积							5 年累积		
	2014	2015	2016	2017	2018	5-years	2014	2015	2016	2017	2018	5-years			
					Accumulation							Accumulation			
CK1	11.2d	12.6e	11.6e	12.2d	11.0d	58.5e	44.6d	51.0e	46.6f	49.2f	43.8c	235.1f			
CK2	46.0b	48.8c	53.1c	48.9c	10.1d	206.9c	148.5b	160.1b	171.6c	158.2c	40.9c	679.3c			
BBF1	16.4cd	17.0de	22.2d	15.7d	19.1bc	90.5d	68.4c	71.1d	92.3e	65.3e	80.1b	377.2e			
BBF2	59.0a	67.6b	70.7b	63.6b	17.5c	278.4b	230.0a	269.1a	274.1b	253.4b	78.8b	1 105b			
CRF1	17.2c	19.7d	22.4d	17.5d	20.1b	96.9d	83.3c	95.8c	108.8d	85.3d	97.2a	470.5d			
CRF2	64.3a	78.3a	82.3a	74.0a	22.3a	321.1a	235.7a	285.3a	304.0a	269.9a	99.6a	1 195a			

注：CK1：不施氮且秸秆不还田处理；CK2：不施氮但秸秆还田处理；BBF1：普通尿素但秸秆不还田处理；BBF2：普通尿素且秸秆还田处理；CRF1：控释掺混尿素但秸秆不还田处理；CRF2：控释掺混尿素且秸秆还田处理。2014—2017 年秸秆还田生物量为小麦和玉米两季之和，2018 年秸秆还田生物量仅小麦季。同列数据后标有相同字母表示处理间在 0.05 水平差异不显著。下同。Note: CK1: No nitrogen applied or straw returned; CK2: No nitrogen applied in addition to straw returning; BBF1: Common urea applied only; BBF2: Common urea applied in addition to straw returning; CRF1: Mixture applied only; CRF2: Mixture applied in addition to straw returning. Biomass input with the straw returned was the sum of wheat and maize straw returned in 2014—2017, and biomass input with the straw returned was just the straw of wheat in 2018. Means followed by same lowercase letters within the same column of each item were not significantly different at 5% level. The same below.

尿素 BBF2 处理较不还田普通尿素 BBF1 处理带入土壤中的 N-P₂O₅-K₂O 增加量为 281.8-187.9-728.2 kg·hm⁻²。秸秆还田条件下，控释掺混尿素 CRF2 处理较普通尿素 BBF2 处理的秸秆还田增加的生物量为 9 220 kg·hm⁻²，还田秸秆带入土壤中的

N-P₂O₅-K₂O 增加量为 119.1-42.7-89.2 kg·hm⁻²。

2.2 秸秆还田配施控释掺混尿素对玉米产量的影响

秸秆还田配施控释掺混尿素显著影响玉米产量（表 2），秸秆还田条件下，控释掺混尿素 CRF2 处理的 5 年平均玉米产量较普通尿素 BBF2 处理显著提

表 2 2014—2018 年不同处理的玉米产量

Table 2 Yield of maize relative to treatment during 2014—2018

处理 Treatment	玉米产量					平均产量 Mean yield/ (kg·hm ⁻²)	较 BBF1 增产	较 CRF1 增产	
	Maize grain yield/ (kg·hm ⁻²)						较 BBF2 增产	Yield	
							Yield increment	Yield	
	2014	2015	2016	2017	2018		over Treatment	increment	
						BBF2/%	over Treatment		
							BBF1/%		
							CRF1/%		
CK1	7 122d	7 094d	8 093d	6 746d	7 728d	7 377f	-34.1	-30.2	-36.8
CK2	7 226d	7 899c	8 689d	8 148c	8 319cd	8 035e	-28.2	-24.0	-31.1
BBF1	9 683c	12 122b	10 538c	10 892b	9 608bc	10 569d	-5.6	--	-9.4
BBF2	10 058bc	12 236b	12 021b	11 441b	10 224b	11 196c	--	5.9	-4.0
CRF1	9 943bc	12 600b	14 030a	11 463b	10 284b	11 664b	4.2	10.4	--
CRF2	10 624a	13 258a	14 330a	12 776a	11 694a	12 537a	12.0	18.6	7.5

注：2014—2015 年不同处理的玉米产量已发表^[6]。Note: Yield data for the 2014—2015 different treatments was published^[6] separately.

高 12.0%；秸秆还田的 CRF2、BBF2 处理相比秸秆不还田的同类肥料 CRF1、BBF1 处理的 5 年平均玉米产量则分别显著提高 7.5%和 5.9%。秸秆不还田条件下,CRF1 处理的 5 年平均玉米产量较 BBF1 处理显著提高 10.4%。这表明秸秆还田配施控释掺混尿素增产效果优于秸秆还田配施普通尿素。

相同试验条件下,对 2018 年当季玉米生物量、产量及构成因素进行分析(表 3)。秸秆还田条件下,较普通尿素 BBF2 处理,控释掺混尿素 CRF2 处理玉米籽粒产量显著提高 14.4%,茎秆生物量显著提高 10.2%,地上部生物量显著提高 7.0%,但百粒重、行数及行粒数无显著差异;秸秆不还田条件下,较普通尿素基肥加追肥 BBF1 处理,CRF1 处理一次性施肥不追肥依然稳产。施用控释掺混尿素条件下,秸秆还田的 CRF2 处理相比 CRF1 处理籽粒产量显

著提高 13.7%,地上部生物量显著提高 3.4%;秸秆还田的 BBF2 处理相比秸秆不还田的 BBF1 处理产量无显著差异,茎秆生物量显著提高 7.1%。

2.3 秸秆还田配施控释掺混尿素对玉米氮素利用率的影响

秸秆还田的 CRF2、BBF2 处理相比秸秆不还田的同类肥料 CRF1、BBF1 处理氮素累积利用率分别显著提高 10.5%和 13.3%,但氮素累积农学利用率及氮肥偏生产力无显著差异。秸秆不还田条件下,CRF1 相比 BBF1 处理氮素累积利用率显著提高 61.3%,氮肥累积农学利用率显著提高 27.4%;秸秆还田条件下,CRF2 相比 BBF2 处理氮素累积利用率显著提高 57.5%,氮素累积农学利用率显著提高 24.7%;秸秆还田与不还田条件下,控释尿素处理较普通尿素处理的氮肥偏生产力无显著差异(表 4)。

表 3 不同处理的玉米产量和产量构成因素(2018)

Table 3 Yield and yield composition of maize relative to treatment (2018)

处理 Treatment	地上部生物量 Aboveground biomass /(kg·hm ⁻²)	籽粒产量 Grain yield /(kg·hm ⁻²)	茎秆生物量 Stalk biomass /(kg·hm ⁻²)	百粒重 Hundred-grain weight/g	行数 Ear row	行粒数 Grains per row	较 BBF2 增产 Yield increment over Treatment BBF2/%
CK1	16 541d	7 728d	8 813d	27.0b	15.2a	34.8a	-24.4
CK2	17 366d	8 319cd	9 047d	27.6b	15.0a	34.9a	-18.6
BBF1	19 476c	9 608bc	9 868c	29.7a	14.9a	33.8a	-6.0
BBF2	20 791bc	10 224b	10 568b	30.1a	14.9a	32.8a	--
CRF1	21 505b	10 284b	11 222a	30.2a	15.2a	33.1a	0.6
CRF2	22 245a	11 694a	11 651a	30.8a	15.0a	33.0a	14.4

表 4 不同处理的玉米肥料利用率(2018)

Table 4 Fertilizer use efficiency of maize relative to treatment (2018)

处理 Treatment	氮素累积量 N accumulation /(kg·hm ⁻²)	氮素累积利用率 Accumulative N use efficiency (ANUE) /%	氮肥累积农学利用率 Accumulative N agronomic efficiency /(kg·kg ⁻¹)	氮肥偏生产力 N partial factor productivity /(kg·kg ⁻¹)	氮素累积利用率 增加 ANUE change vs BBF2 /%
CK1	110.1e	--	--	--	--
CK2	116.0e	--	--	--	--
BBF1	144.6d	33.1d	23.7c	64.1b	-11.7
BBF2	155.3c	37.5c	26.7bc	68.2ab	--
CRF1	185.1b	53.4b	30.2ab	68.6ab	42.4
CRF2	198.0a	59.0a	33.3a	78.0a	57.3

2.4 秸秆还田配施控释掺混尿素对玉米经济效益的影响

小区试验实打实收换算而来的经济效益估算虽较田间实际收入有所差异，但各处理间的相对比较依然具有重要参考价值。本研究条件下，秸秆还田配施控释掺混尿素对玉米经济效益存在显著的影响（表 5）。较普通尿素处理，控释掺混尿素处理虽每

公顷提高了 213.2 yuan，但因减少了追肥，可节省施肥人工成本 493.8 yuan，配合相对产量的提高，实现农民增收。秸秆还田条件下，CRF2 处理较 BBF2 处理总收益显著提高 14.4%，净收益显著提高 23.6%。秸秆不还田条件下，CRF1 相比 BBF1 处理总收益提高 7.1%，净收益提高 13.1%，说明秸秆还田能够进一步提高控释掺尿素的增收效果。

表 5 不同处理的玉米经济效益估算（2018）

Table 5 Economic benefit estimation of maize relative to treatment (2018)

处理 Treatment	总收益 Total revenue /(yuan·hm ⁻²)	肥料 Fertilizer costs /(yuan·hm ⁻²)	施肥用工 Fertilization labor cost /(yuan·hm ⁻²)	其他支出 Other costs /(yuan·hm ⁻²)	净收益 Net profit /(yuan·hm ⁻²)	增收 Change/%
CK1	16 494d	476.6	493.7	4 497	11 027c	-23.9
CK2	17 754cd	476.6	493.7	4 497	12 287bc	-15.2
BBF1	20 506bc	1 852	987.5	4 497	13 170bc	-9.1
BBF2	21 820b	1851.5	987.5	4 497	14 484b	--
CRF1	21 948b	2064.7	493.7	4 497	14 893b	2.8
CRF2	24 959a	2064.7	493.7	4 497	17 904a	23.6

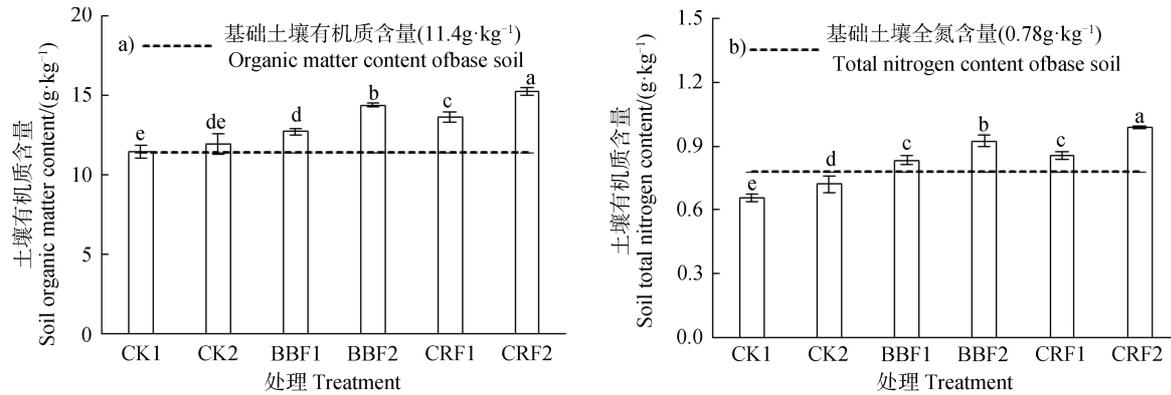
注：国内平均价格：树脂包膜尿素、硫树脂包膜尿素、普通尿素、氯化钾、过磷酸钙、磷酸二铵、玉米的价格分别为：2 373、1 919、1 626、2 541、1 017、3 050、2 134 yuan·t⁻¹，单次施肥人工成本是 494 yuan·hm⁻²，其他成本包括：机械、灌溉、农药、种子等^[16]。Note: The average price in China for PCU is 2 372 yuan·t⁻¹, for PSCU 1 919 yuan·t⁻¹, for urea 1 626 yuan·t⁻¹, for potassium chloride 2 541 yuan·t⁻¹, for calcium superphosphate 1 017 yuan·t⁻¹, for diammonium phosphate 3 050 yuan·t⁻¹, for maize 2 134 yuan·t⁻¹, for labor cost of single fertilization for one time 494 yuan·hm⁻². Other costs include machinery, irrigation, pesticide, insecticide, seeds, other materials and expenses^[16].

2.5 秸秆还田配施控释掺混尿素对土壤养分的影响

不同施肥处理下的土壤有机质含量和全氮含量与 2013 年小麦试验播种前的基础土壤相比差异显著（图 2），2018 年 10 月玉米收获后，秸秆还田的 CRF2、BBF2 处理相比基础土壤有机质含量分别显著提高 33.5%、25.9%，全氮含量分别显著提高 26.6%、18.6%。秸秆不还田的 CRF1、BBF1 处理相比基础土壤有机质含量分别显著提高 19.5%、11.4%，全氮含量分别显著提高 9.9%、7.0%。秸秆还田的 CRF2、BBF2 处理相比秸秆不还田的同类肥料 CRF1、BBF1 处理分别显著提高土壤有机质含量 11.8%、13.0%，全氮含量 15.2%、10.9%。秸秆还田条件下，CRF2 相比 BBF2 处理有机质含量显著提高 6.1%，全氮含量显著提高 6.7%。说明秸秆还田有利于土壤有机质和全氮的累积，配施控释掺混尿素较普通尿素更有利于提高土壤有机质含量和全氮含量。

玉米成熟期 0~20 cm 土壤硝态氮、铵态氮含量均表现出：CRF2>CRF1>BBF2>BBF1（图 3）。单施控释掺混尿素 CRF1 处理相比普通尿素 BBF1 处理硝态氮和铵态氮分别显著提高 52.0%和 18.6%。秸秆还田条件下，CRF2 相比 BBF2 处理硝态氮和铵态氮分别显著提高 39.3%和 16.6%，这表明控释掺混尿素有利于提高土壤氮素的供应强度，配施还田秸秆能在提高供应强度的基础上进一步提高土壤氮素的供应容量。

秸秆还田的 CRF2、BBF2 处理相比秸秆不还田的同类肥料 CRF1、BBF1 处理显著提高速效钾含量 18.2%、28.0%，有效磷含量无显著差异（图 4），说明秸秆还田有利于提高土壤速效钾的含量，秸秆有效磷含量低且易与土壤钙镁离子结合，故无显著性差异。秸秆不还田条件下，CRF1 相比 BBF1 处理有效磷和速效钾含量分别显著提高 19.5%和 24.7%。



注：图中字母不同表示处理间数据差异显著 ($P < 0.05$)。下同。Note: Different letters in this figure indicate significant differences between treatments at $P < 0.05$. The same below.

图 2 玉米成熟期不同处理的土壤有机质含量 (a)) 和全氮含量 (b))

Fig. 2 Soil organic matter content (a)) and total nitrogen content (b)) at the maize maturing stage relative to treatment

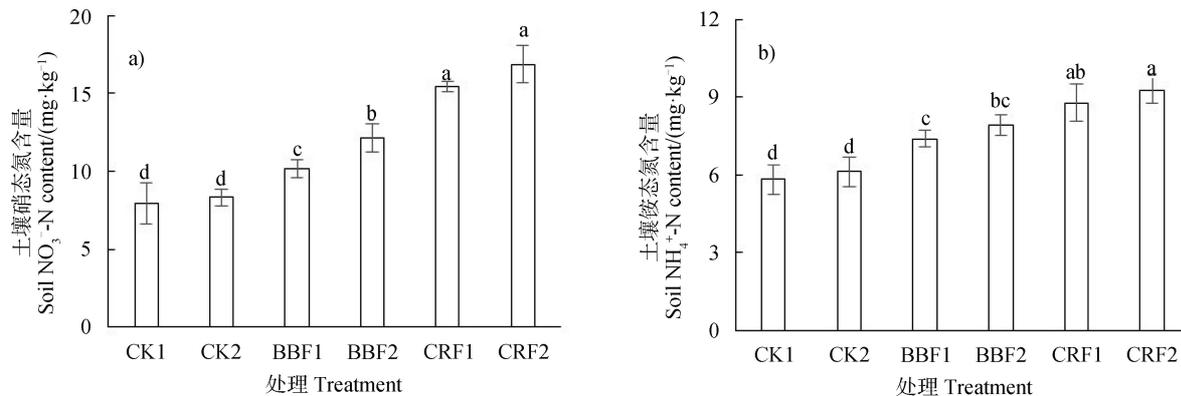


图 3 玉米成熟期不同处理的土壤硝态氮含量 (a)) 和铵态氮 (b)) 含量

Fig. 3 Soil NO₃⁻-N content (a)) and NH₄⁺-N content (b)) at the maize maturing stage relative to treatment

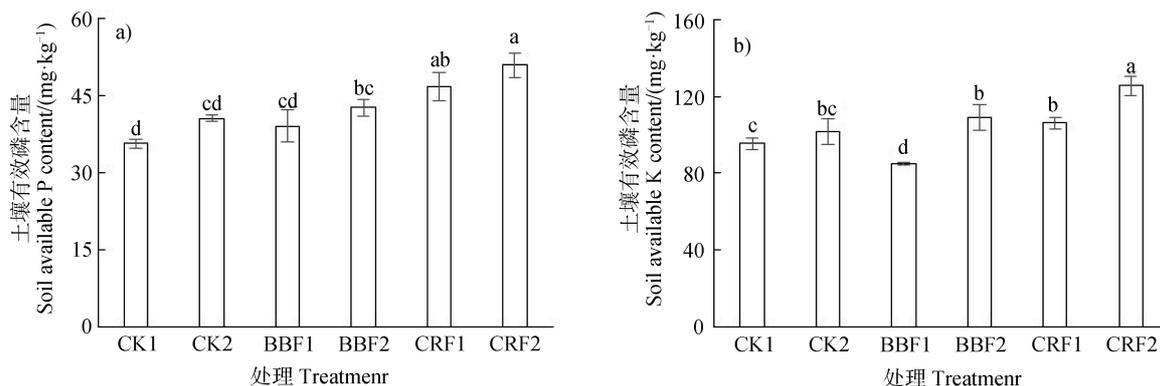


图 4 玉米成熟期不同处理的土壤有效磷含量 (a)) 和速效钾含量 (b))

Fig. 4 Soil available P content (a)) and available K content (b)) of maize at the maturing stage relative to treatment

秸秆还田配施控释掺混尿素更有利于土壤有效磷和速效钾的释放, CRF2 相比 BBF2 处理显著提高有效磷含量 19.5%, 显著提高速效钾含量 15.1%。

2.6 秸秆还田配施控释掺混尿素对叶面积指数和 SPAD 的影响

充足的氮素能够更好地维持群体冠层叶面积指

数和 SPAD。BBF2 处理相比 BBF1 处理叶面积指数显著提高 7.1% (图 5)。秸秆还田的 CRF2、BBF2 处理相比秸秆不还田的同类肥料 CRF1、BBF1 处理 SPAD 含量无显著性差异, 但秸秆还田配施控释掺混尿素 CRF2 处理相比 BBF2 处理则显著提高 SPAD 8.6%, 说明秸秆还田配施控释掺混尿素进一步提高了氮素的供应强度和容量。

3 讨论

3.1 秸秆还田配施控释掺混尿素对玉米产量及养分利用率的影响

缓控释肥是一种通过物理或化学方法, 使其有效养分按照设定释放率和释放期缓慢释放的化学肥料^[17], 能减少作物根区土壤无机氮淋失、维持土壤养分供应强度, 提高肥料利用效率。PCU 是控释效果较好、应用较广的一类缓控释肥。其养分释放机

制主要是水分进入膜壳, 溶解膜内肥芯形成尿素饱和溶液, 使其在膜内外浓度差的驱动下持续释放^[18]。硫包膜尿素存在爆发性释放的缺点, 可能会引起局部伤根烧苗^[19]。PSCU 在硫包膜尿素表面包覆聚合物, 使养分从硫膜的微孔和裂隙中缓慢释放时避免硫膜破裂^[20]。供试控释掺混尿素分别由普通尿素、PSCU 和 PCU 按照 3 : 3.5 : 3.5 比例掺混而成; 占比总氮养分 30% 的普通尿素可以保障苗期养分需求; 占比 35% 的 PSCU 养分释放高峰期在 30~40 d, 可满足夏玉米氮素最大效率期 (拔节期) 的氮素需求; 占比 35% 的供试 PCU 养分释放高峰在 50~60 d^[21], 可满足夏玉米大喇叭口期的氮素需求, 两者按照 1 : 1 混施可分别满足玉米关键生育时期 (拔节期和大喇叭口期) 的氮素需求。本试验条件下, 与 BBF1 处理相比, CRF1 处理硝态氮含量显著提高 8.1%, 铵态氮含量显著提高 7.8% (图 3b)), 与 Zheng 等^[16]研究结果一致。

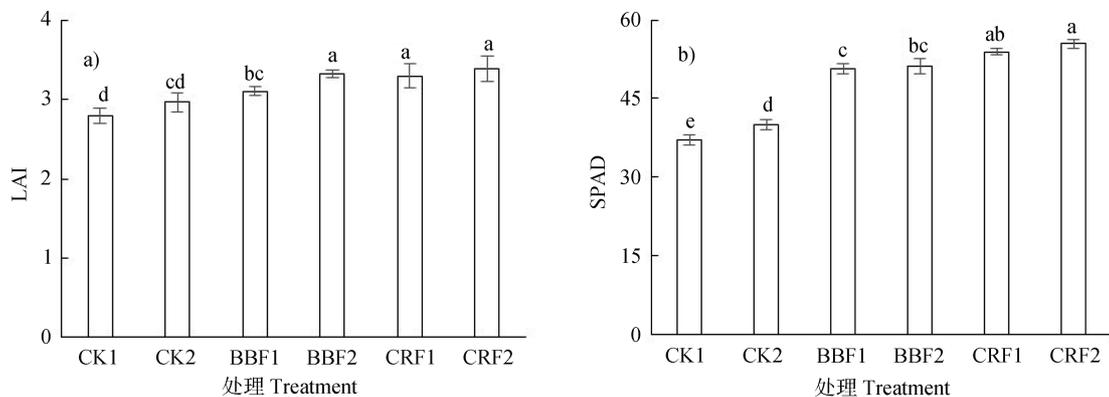


图 5 玉米成熟期不同处理的叶片叶面积指数 (LAI, a) 和叶绿素相对含量测定值 (SPAD, b))

Fig. 5 Leaf area index (LAI, a) and SPAD (b) of maize leaves with different treatments at mature period

秸秆科学还田再利用是提高作物产量的重要措施之一^[22]。本试验条件下, 秸秆还田配施控释掺混尿素 CRF2 处理相比秸秆还田配施普通尿素 BBF2 处理, 玉米 5 年平均产量显著提高 12.0% (表 3), 氮素累积利用率显著提高 57.3% (表 4)。玉米秸秆快速腐烂阶段约持续 15 d, 分解的是多糖、淀粉和蛋白质等可溶性部分, 禾本科秸秆的碳氮比较微生物自身高, 会出现苗期微生物消耗养分与作物争氮的现象^[23], 控释掺混尿素中普通尿素的添加可有效缓解这一现象。秸秆的缓慢腐烂阶段从第 15 天持续到第 190 天左右, 主要分解纤维素、半纤维素和木质素等难降解的大分子有机化合物^[24]。控释掺混尿

素中缓慢释放的氮可调控作物全生育期土壤碳氮比, 并满足微生物对有效氮的需求, 促使土壤由细菌群落主导向真菌群落主导转变, 提高木霉属和青霉属等真菌的活性。木霉菌含有完全水解天然纤维素所需的微晶纤维素酶、羧甲基纤维素酶和 β -葡糖苷酶, 通过胞外酶方式将纤维素解聚, 使其包裹的部分有机氮磷钾以矿质盐类形式释放, 提高土壤养分含量^[25]。活化的青霉菌可氧化有机物质为多元酚等芳香族化合物, 在多酚氧化酶作用下生成醌, 与土壤含氮化合物聚合为黄腐酸、胡敏酸和胡敏素^[26], 培肥地力、提高作物产量。秸秆还田对产量的正向效应还可能是秸秆还田配施氮肥促进了物质合成与

转化^[27]。本研究 BBF2 相比 BBF1 处理茎秆生物量和叶面积指数分别显著提高 7.1%和 7.0% (表 3 和图 5a)); BBF2 相比 BBF1 处理显著提高硝态氮含量 19.4% (图 3a)), 可能是由于 BBF2 中还田秸秆增强土壤蓄水保肥能力, 减少养分淋失。CRF2 相比 CRF1 处理显著提高了玉米籽粒产量 (表 3), 但茎秆生物量和叶面积指数均无显著提高 (表 3 和图 5a)), 这可能是由于缓释氮素可持续激发还田秸秆的降解, 提高玉米吐丝期的土壤养分供应和叶片养分向籽粒的转运效率^[28]。

3.2 秸秆还田配施控释掺混尿素对土壤肥力的影响

薛斌等^[29]研究认为, 秸秆还田配施氮肥能有效提高 0~20 cm 耕层土壤中的全氮、有机质、有效磷和速效钾含量。本试验条件下, 2018 年玉米收获期

的 CRF2 相比 BBF2 处理, 土壤有机质和全氮含量分别显著提高 5.6%和 6.5%, 且年均还田秸秆量与土壤全氮含量, 有机质含量极相关 (表 6)。可能是由于控释掺混尿素持续供氮, 为秸秆还田降解过程中碳氮比的调控补充氮源, 提高土壤微生物活性, 促进还田秸秆降解。秸秆中丰富的氢碳资源通过提升土壤腐殖质的芳香度, 优化有机碳结构并提高其稳定性, 增加土壤有机碳储量^[30]。另一方面, 土壤团聚体的物理保护是土壤有机碳的重要稳定机制。钙镁离子可与腐殖质芳香环上的酚羟基结合形成复合物, 随后吸附在黏粒表面形成有机无机复合物, 增加土壤团聚体的水稳性。氮素缓释可降低土壤胶体吸附的钙镁离子被土壤溶液中过量铵离子置换而随水淋失的风险, 更有利于有机碳的储存^[31]。

表 6 玉米产量与各项试验指标的相关性

Table 6 Correlation analysis of maize yield with various experimental indexes

	产量 ^①	氮素 累积 利用率 ^②	叶绿素		土壤 全氮 ^⑤	土壤 有机质 ^⑥	土壤 硝态氮 ^⑦	土壤 铵态氮 ^⑧	土壤 有效磷 ^⑨	土壤 速效钾 ^⑩	年均秸 秆 还田量 ^⑪	年均秸 秆 带氮量 ^⑫	年均秸 秆 带 P ₂ O ₅ 量 ^⑬
			叶面积 指数 ^③	相对含 量 测定值 ^④									
氮累积利用率 ^②	0.860**												
叶面积指数 ^③	0.311	0.599*											
叶绿素相对含量测定值 ^④	0.780**	0.709**	0.425										
土壤全氮 ^⑤	0.674*	0.764**	0.654*	0.497									
土壤有机质 ^⑥	0.584*	0.762**	0.532	0.385	0.789**								
土壤硝态氮 ^⑦	0.632*	0.827**	0.635*	0.769**	0.594*	0.557							
土壤铵态氮 ^⑧	0.433	0.536	0.49	0.551	0.346	0.243	0.722**						
土壤有效磷 ^⑨	0.580*	0.753**	0.634*	0.747**	0.679*	0.592*	0.897**	0.750**					
土壤速效钾 ^⑩	0.606*	0.759**	0.757**	0.614*	0.861**	0.823**	0.791**	0.512	0.773**				
年均秸秆还田量 ^⑪	0.602*	0.716**	0.596*	0.375	0.938**	0.891**	0.471	0.14	0.521	0.831**			
年均秸秆带氮量 ^⑫	0.630*	0.720**	0.569	0.41	0.940**	0.885**	0.472	0.151	0.532	0.827**	0.998**		
年均秸秆带 P ₂ O ₅ 量 ^⑬	0.582*	0.698*	0.487	0.539	0.763**	0.572	0.712**	0.208	0.568	0.760**	0.736**	0.735**	
年均秸秆带 K ₂ O 量 ^⑭	0.717**	0.864**	0.665*	0.591*	0.918**	0.904**	0.769**	0.426	0.747**	0.957**	0.914**	0.913**	0.815**

注: * 和 ** 分别表示显著 (P<0.05) 和极显著 (P<0.01) 相关。Note: *, significant correlation at P<0.05; **, extremely significant correlation at P<0.01. ①Yield, ②ANUE, ③LAI, ④SPAD, ⑤Soil total nitrogen, ⑥Soil organic matter, ⑦Soil NO₃-N, ⑧Soil NH₄⁺-N, ⑨Soil available P, ⑩Soil available K, ⑪Average year straw returned biomass, ⑫Average year amount of N from straw, ⑬Average year amount of P₂O₅ from straw, ⑭Average year amount of K₂O from straw.

土壤有效磷和速效钾同样是评价土壤肥力的重要指标^[32]。本研究中, CRF2 相比 BBF2 处理显著提

高土壤有效磷含量 19.5% (图 4a)), 可能是由于还田秸秆中的有机化合物在土壤微生物作用下发生矿

化反应释放能量, 促进解磷菌产生磷酸酶、植酸酶和核酸酶等水解酶, 去除有机磷底物分子上的磷酸基团生成磷酸根离子^[33], 提高土壤有效磷含量。还田秸秆带入钾量与土壤速效钾含量呈现极显著正相关(表 6), 秸秆还田的 CRF2 处理较 BBF2 处理显著提高土壤速效钾含量 15.1% (图 4b))。这是由于钾素在秸秆中主要以非细胞结构的无机盐形式存在, 含量较高且易释放; 秸秆腐解过程产生的小分子脂肪族、芳香族有机酸^[34]能通过水解作用解离出土壤矿物如钾长石、白云母固定的钾离子^[35], 提高土壤速效钾含量。

4 结 论

在秸秆还田条件下, 控释掺混尿素一次性基施 (CRF2) 相比普通尿素基肥加追肥 (BBF2) 处理, 5 年 9 季累积还田秸秆带入土壤的养分 (N-P₂O₅-K₂O) 总增加量为 119.1-42.7-89.2 kg·hm⁻²; 2018 年玉米收获期土壤有机质和全氮含量显著提高 6.1%、6.7%, 硝态氮和铵态氮含量显著提高 39.3%、16.6%, 有效磷和速效钾含量显著提高 19.5%、15.1%, 从而使氮肥累积利用率显著提高 57.3%, 玉米产量显著提高 12.0%。虽然控释尿素提高了肥料投入成本, 但一次性施肥不追肥节省了人工成本, 配合增产效应, 最终农民纯收益显著提高 23.6%。因此, 秸秆还田配合控释掺混尿素一次性基施可显著培肥土壤, 提高作物产量, 具有广阔的应用前景和推广价值。

参考文献 (References)

- [1] Liu S P, Nie X T, Zhang H C, et al. Effects of tillage and straw returning on soil fertility and grain yield in a wheat-rice double cropping system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22 (7): 48—51. [刘世平, 聂新涛, 张洪程, 等. 稻麦两熟条件下不同土壤耕作方式与秸秆还田效用分析[J]. 农业工程学报, 2006, 22 (7): 48—51.]
- [2] Zhao P, Chen F. Effects of straw mulching plus nitrogen fertilizer on nitrogen efficiency and grain yield in winter wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 2008, 34 (6): 1014—1018. [赵鹏, 陈阜. 秸秆还田配施化学氮肥对冬小麦氮效率和产量的影响[J]. 作物学报, 2008, 34 (6): 1014—1018.]
- [3] Li T, He C E, Ge X Y, et al. Responses of soil mineral N contents, enzyme activities and crop yield to different C/N ratio mediated by straw retention and N fertilization[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24 (12): 1633—1642. [李涛, 何春娥, 葛晓颖, 等. 秸秆还田施氮调节碳氮比对土壤无机氮、酶活性及作物产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24 (12): 1633—1642.]
- [4] Kumar K, Goh K M. Nitrogen release from crop residues and organic amendments as affected by biochemical composition[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2003, 34 (17/18): 2441—2460.
- [5] Singh B, Rengel Z. The role of crop residues in improving soil fertility[M]//Marschner P, Rengel Z. Nutrient Cycling in Terrestrial Ecosystems. Berlin Heidelberg: Springer, 2007: 183—214
- [6] Li T, Ge X Y, He C E, et al. Mixing alfalfa straw and maize straw to enhance nitrogen mineralization, microbial biomass and enzyme activity: A laboratory study[J]. Agricultural Science & Technology, 2016, 17 (8): 1869—1874. [李涛, 葛晓颖, 何春娥, 等. 苜蓿秸秆配施玉米秸秆还田对氮矿化、微生物生物量和酶活性的影响[J]. 农业科学与技术, 2016, 17 (8): 1869—1874.]
- [7] Zhang S Y, Wang H Z, Yang M D, et al. Influence of returning corn stalks to field under different soil moisture contents on root growth and water use efficiency of wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49 (13): 2484—2496. [张素瑜, 王和洲, 杨明达, 等. 水分与玉米秸秆还田对小麦根系生长和水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49 (13): 2484—2496.]
- [8] Yuan M M, Wu G, Hu R, et al. Effects of straw returning plus fertilization on crop yield and fertilizer use efficiency in rice-rapeseed rotation system[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37 (12): 3597—3604. [袁嫋嫋, 邬刚, 胡润, 等. 稻油轮作下秸秆还田配施化肥对作物产量及肥料利用率的影响[J]. 生态学杂志, 2018, 37 (12): 3597—3604.]
- [9] Zhang H Y, Niu L A, Hao J M, et al. Effects of straw returning combined with slow release fertilizer on soil nutrient and crop yield[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, 49 (1): 140—149. [张华艳, 牛灵安, 郝晋珉, 等. 秸秆还田配施缓控释肥对土壤养分和作物产量的影响[J]. 土壤通报, 2018, 49 (1): 140—149.]
- [10] Shaviv A. Advances in controlled-release fertilizers[M]//Advances in Agronomy. Amsterdam: Elsevier, 2001: 1—49.
- [11] Zheng W K, Liu Z G, Zhang M, et al. Improving crop yields, nitrogen use efficiencies, and profits by using mixtures of coated controlled-released and uncoated urea in a wheat-maize system[J]. Field Crops Research, 2017, 205 (6): 106—115.
- [12] Dong Y L, Li Z F, Wang R L, et al. Study on the problems

- and countermeasures of returning wheat and corn stalks into the soil in North China[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2018 (1): 159—163. [董印丽, 李振峰, 王若伦, 等. 华北地区小麦、玉米两季秸秆还田存在问题及对策研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2018 (1): 159—163.]
- [13] Zhou H Y, Zhang M, Liu Z G, et al. Maize yield and economic return with controlled-release urea[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2019, 115 (3): 427—440.
- [14] Bao S D. Soil and agro-chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [15] Tian C Y, Lin Z A, Zuo Y B, et al. Review on several concepts on fertilizer nitrogen recovery rate and its calculation[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42 (6): 1530—1536. [田昌玉, 林治安, 左余宝, 等. 氮肥利用率计算方法评述[J]. *土壤通报*, 2011, 42 (6): 1530—1536.]
- [16] 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 (197): 52—62.
- [17] Chen J Q, Zhang M, Yang Y C. Study on nutrient releasing characteristics of membrane wrapping control-releasing fertilizer[J]. *Chemical Fertilizer Design*, 2006, 44 (2): 56—58. [陈剑秋, 张民, 杨越超. 包膜控释肥养分释放特性的研究[J]. *化肥设计*, 2006, 44 (2): 56—58.]
- [18] Yang X, Wu L H, Wu S F, et al. Nitrogen release characteristic of polymer coated urea in paddy soil and its relationship with cumulative temperature[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32 (2): 199—204. [杨铎, 吴良欢, 伍少福, 等. 树脂包膜尿素在稻田中的释放特征及与积温的关系[J]. *农业工程学报*, 2016, 32 (2): 199—204.]
- [19] Kochba M, Ayalon O, Avnimelech Y. Slow release rate: Individual granules and population behaviour[J]. *Fertilizer Research*, 1994, 39 (1): 39—42.
- [20] [20] Yang Y C, Zhang M, Chen J Q, et al. Nutrient release characteristics of polymer-sulphur coated urea[J]. *Chemical Fertilizer Industry*, 2006, 33 (1): 26—30. [杨越超, 张民, 陈剑秋, 等. 聚合物硫包尿素的养分释放特征[J]. *化肥工业*, 2006, 33 (1): 26—30.]
- [21] Zheng W K, Sui C L, Liu Z G, et al. Long-term effects of controlled-release urea on crop yields and soil fertility under wheat-corn double cropping systems[J]. *Agronomy Journal*, 2016, 108 (4): 1703—1716.
- [22] Jiang C Q, Zheng Q S, Zu C L. Research progress on effects of straw returning on soil potassium and its substitute for potassium fertilizer[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34 (4): 1158—1165. [姜超强, 郑青松, 祖朝龙. 秸秆还田对土壤钾素的影响及其替代钾肥效应研究进展[J]. *生态学杂志*, 2015, 34 (4): 1158—1165.]
- [23] Hodge A, Robinson D, Fitter A. Are microorganisms more effective than plants at competing for nitrogen?[J]. *Trends in Plant Science*, 2000, 5 (7): 304—308.
- [24] Chen H Q, Fan M S, Billen N, et al. Effect of land use types on decomposition of ¹⁴C-labelled maize residue (*Zea mays* L.) [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2009, 45 (2): 123—130.
- [25] Shi Y, Jiang A Q, Dai C C, et al. Advanced in microbiological mechanism and application of straw degradation[J]. *Journal of Microbiology*, 2002, 22 (1): 47—50. [史央, 蒋爱芹, 戴传超, 等. 秸秆降解的微生物学机理研究及应用进展[J]. *微生物学杂志*, 2002, 22 (1): 47—50.]
- [26] Guan S Y. Soil enzymes and its research methods [M]. Beijing: Agriculture Press, 1986. [关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.]
- [27] Liu Y G, Lin Q, Wang Y F, et al. Effects of coupling of straw-return and nitrogen fertilizer on photosynthetic characters and yield of winter wheat[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15 (1): 42—44. [刘义国, 林琪, 王月福, 等. 秸秆还田与氮肥耦合对冬小麦光合特性及产量形成的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2007, 15 (1): 42—44.]
- [28] Wen L Y, Xue Y F, Zhang H, et al. The characteristics of nitrogen translocation of maize inbred lines with different nitrogen efficiency from anthesis to maturity[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2019, 25 (4): 568—578. [温立玉, 薛艳芳, 张慧, 等. 不同氮效率玉米品种亲本自交系花粒期氮素转运特性[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25 (4): 568—578.]
- [29] Xue B, Yin Z Y, Xiao Q, et al. Effects of long-term straw returning on soil fertility under rice rape rotation system[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33 (7): 134—141. [薛斌, 殷志遥, 肖琼, 等. 稻-油轮作条件下长期秸秆还田对土壤肥力的影响[J]. *中国农学通报*, 2017, 33 (7): 134—141.]
- [30] Cong P. Fertilization effect and mechanism of subsoil under high dosage straw returning in black soil of Northeast China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019. [丛萍. 秸秆高量还田下东北黑土亚耕层的培肥效应与机制[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.]
- [31] Mao X L, Lu K P, He L Z, et al. Effect of long-term fertilizer application on distribution of aggregates and aggregate-associated organic carbon in paddy soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (4): 828—838. [毛霞丽, 陆扣萍, 何丽芝, 等. 长期施肥对浙江稻田土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J]. *土壤学报*, 2015, 52 (4): 828—838.]

- [32] Lu J Y, Zhang S R, Li T, et al. Study on spatial distribution of available phosphorus and potassium in Tianquan River basin[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2011, 24 (4): 1409—1414. [卢俊宇, 张世熔, 李婷, 等. 天全河流域土壤速效磷钾的空间分布特征研究[J]. 西南农业学报, 2011, 24 (4): 1409—1414.]
- [33] Wang G H, Zhao Y, Zhou D R, et al. Review of phosphate-solubilizing microorganisms[J]. Ecology and Environment, 2003 (1): 96—101. [王光华, 赵英, 周德瑞, 等. 解磷菌的研究现状与展望[J]. 生态环境, 2003 (1): 96—101.]
- [34] Wu J G, Lü Y, Wang M H, et al. Study on decomposition of organic fertilizers by FTIR[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10 (3): 259—266. [吴景贵, 吕岩, 王明辉, 等. 有机肥腐解过程的红外光谱研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10 (3): 259—266.]
- [35] Cui J Y, Ren L, Wang J G, et al. Effect of organic acids on mobilization of K from K-bearing minerals and stochastic simulation of dynamic K release[J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39 (3): 341—350. [崔建宇, 任理, 王敬国, 等. 有机酸影响矿物钾释放的室内试验与数学模拟[J]. 土壤学报, 2002, 39(3): 341—350.]

(责任编辑：陈荣府)