

于小晶, 田晓飞, 张 民, 等. 控释氮肥和控释钾肥对棉花产量、品质及土壤肥力的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(3): 313-321.

YU Xiao-jing, TIAN Xiao-fei, ZHANG Min, et al. Effects of controlled-release nitrogen and potassium fertilizer on cotton yield, fiber quality and soil fertility [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(3): 313-321.

控释氮肥和控释钾肥对棉花产量、品质及土壤肥力的影响

于小晶¹, 田晓飞¹, 张 民^{1,2,3*}, 李成亮^{1*}, 孙玲丽², 刘之广¹, 陈剑秋³

(1. 土壤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. 众德肥料(平原)公司, 山东 德州 253100; 3. 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 临沂 276700)

摘 要:为探究控释氮肥和控释钾肥在棉花上的应用效果,于2014年和2015年在山东省金乡县进行了连续两年的田间定位试验,以当地习惯施肥为对照(CK),研究普通尿素60%基施+40%追施(CU),控释氮肥一次基施(CRN)和控释氮肥、控释钾肥一次基施(CRNK)对棉花产量、品质和0~100 cm土壤养分状况的影响。结果表明,硫加树脂包膜尿素、树脂包膜尿素、树脂包膜氯化钾田间养分释放期分别为65、86、82 d,一次性基施可供应棉花整个生育期养分需求。与CK相比,CRN和CRNK处理提高了棉花单铃质量和成铃数,分别显著提高皮棉产量15.0%~20.1%和22.1%~23.3%,提高经济效益44.9%~59.4%;与CU处理相比,CRN和CRNK处理显著提高了皮棉产量,分别增产9.3%~13.7%和12.1%~21.9%,提高经济效益36.3%~49.9%;CRNK与CRN处理间皮棉产量无显著差异,但CRNK较CRN处理增产2.5%~7.2%。与CK处理相比,CRNK处理棉花收获期0~20 cm土壤硝态氮和速效钾含量显著提高了38.5%和8.9%,且伸长率显著提升了10.0%~11.6%。研究表明,与常规施肥相比,控释氮肥和控释钾肥通过提高土壤硝态氮及速效钾含量,显著提高棉花单铃质量和成铃数,从而提高皮棉产量,节时省工增效,经济效益显著。

关键词:控释肥;棉花;产量;品质;养分含量

中图分类号:S143;S562

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2019)03-0313-09

doi: 10.13254/j.jare.2018.0171

Effects of controlled-release nitrogen and potassium fertilizer on cotton yield, fiber quality and soil fertility

YU Xiao-jing¹, TIAN Xiao-fei¹, ZHANG Min^{1,2,3*}, LI Cheng-liang^{1*}, SUN Ling-li², LIU Zhi-guang¹, CHEN Jian-qiu³

(1. National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China; 2. Zhongde Fertilizer (Pingyuan) Co., Ltd. Dezhou 253100, China; 3. State Key Laboratory of Nutrition Resources Integrated Utilization, Kingenta Ecological Engineering Group Co., Ltd. Linshu 276700, China)

Abstract: To determine the influence of controlled release fertilizers on the yield components of cotton and soil properties, a two-year field experiment was conducted with four treatments: Conventional fertilization, which was urea applied as basal fertilizer (CK); Twice-split applications of urea fertilizer (CU); Controlled release urea as base fertilizer application (CRN); Controlled release urea and controlled release potassium chloride as base fertilizer application (CRNK). The release period of polymer coating of sulfur-coated urea, polymer coated urea, and polymer coated fertilizers potassium chloride in the field was 65, 86, and 82 days, respectively, and the one-time base application could supply the nutrient demand of cotton throughout the growth period. Compared with CK, CRN and CRNK treatments increased cotton single boll weight and boll number, respectively, significantly increased yield by 15.0%~20.1% and 22.1%~23.3%, and improved economic benefits by 44.9%~59.4%; Compared with CU treatment, CRN and CRNK treatments significantly increased the lint yield by 9.3%~13.7% and 12.1%~21.9%, respectively, and improved economic benefits by 36.3%~49.9%. However, there was no significant difference on

收稿日期:2018-06-29 录用日期:2018-09-05

作者简介:于小晶(1993—),女,山东烟台人,硕士研究生,主要从事新型肥料研制与应用。E-mail:family19930428yxj@163.com

*通信作者:张 民 E-mail:minzhang-2002@163.com;李成亮 E-mail:chengliang_li11@163.com

基金项目:山东省重点研发计划项目(2018GNC110001);国家重点研发计划项目(2017YFD0200706);国家自然科学基金项目(41571236)

Project supported: Shandong Provincial Key Research and Development Program (2018GNC110001); The National Key Research and Development Program of China (2017YFD0200706); The National Natural Science Foundation of China (41571236)

the yields of lint cotton between CRNK and CRN, but the lint yield of CRNK increased by 2.5%~7.2% compared with that of CRN. Compared with CK treatment, CRNK treatment significantly increased the contents of nitrate nitrogen and available potassium 38.5% and 8.9% in soil of 0~20 cm at harvest time, and the elongation rate was significantly increased by 10.0%~11.6%. Compared with conventional fertilization, controlled release nitrogen fertilizer and controlled release potassium fertilizer could significantly increase the boll weight and boll-forming number of cottons by increasing the contents of nitrate nitrogen and available potassium in soil, improve cotton fiber quality and soil potassium supply intensity during harvest, save time and labor, and increase economic benefits.

Keywords: controlled release fertilizer; cotton; yield; quality; nutrients content

棉花是我国重要的经济作物和战略物资,合理施肥是棉花高产优质的前提^[1]。棉花养分需求量大,因氮肥和钾肥供应不足引起的早衰已成为限制棉花高产的重要因素^[2-3]。棉花生长期长,养分吸收高峰期出现在蕾期至始絮期^[4],此时提高土壤养分供应能更好地满足棉花养分需求^[5],实现棉花优质高产^[6-7]。但在土壤中,尿素等速效氮肥容易通过地表径流、氨挥发和硝态氮淋溶等途径损失^[8],氯化钾等速效肥料容易转化为非交换性或固定态钾,导致土壤钾素有效性降低,且棉花植株高大、果枝数多的特点导致追肥用工成本高,植棉收益低。因此研究合理的施肥措施来提高棉花产量,对实现棉花轻简化生产具有重要意义。

控释肥料根据作物生长需要释放养分,一次施用就可以满足作物整个生育期对养分的需求^[5-6]。研究表明,控释氮肥养分释放速率与棉花养分吸收速率基本一致^[9],施用控释氮肥可以增加棉铃数和单铃质量。在常规施氮的基础上,减氮 1/3 仍能保持棉花高产、稳产^[10]。也有研究表明,控释钾肥养分释放平稳,释放周期长,能够提高棉花单铃质量^[11]或成铃数^[12],从而实现棉花高产。然而当前研究主要集中在单施控释氮肥或控释钾肥对棉花生长的影响^[8,12-13],田间条件下控释氮肥和控释钾肥配合施用对棉花生长、纤维品质和土壤养分状况的研究鲜见报道。本研究通过连续 2 年的田间试验,探究了控释氮肥和控释钾肥对棉花生长和土壤肥力的影响,可为控释氮钾肥高效应用和棉花提质增产提供技术支持,具有重要的现实意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料

在山东省金乡县周莲池村(34°58'42"N,116°10'56"E)进行连续两年(2014 年和 2015 年)的田间定位试验。试验区位于黄淮海平原,属暖温带季风气候

区,年均气温 13℃(图 1),年均降水量 750 mm。土壤类型为潮土,在我国土壤系统分类中为普通淡色潮湿雏形土。基础土壤 pH 7.67,有机质含量 15.1 g·kg⁻¹,硝态氮、铵态氮含量分别为 21.1、9.8 mg·kg⁻¹,全氮含量为 0.78 g·kg⁻¹,有效磷和速效钾含量分别为 24.6、117.6 mg·kg⁻¹。

供试棉花品种为“鲁研棉 28”,供试速效肥料包括大颗粒尿素(含 N 46%)、磷酸二铵(含 P₂O₅ 46%、N 18%)、硫酸钾(含 K₂O 50%)。供试控释氮肥为金正大集团生产的硫加树脂包膜尿素(PSCU,含 N 36%,释放期 3 个月)和树脂包膜尿素(PCU,含 N 42%,释放期 2 个月);控释钾肥为土肥资源高效利用国家工程实验室研制的树脂包膜氯化钾(CRK,含 K₂O 53%,释放期 3 个月)。

1.2 试验设计

试验共设 4 个处理:(1)当地习惯施肥,一次基施尿素(CK);(2)普通尿素 60% 基施+40% 盛花期追施(CU);(3)一次基施控释氮肥(CRN);(4)一次基施控释氮肥和控释钾肥(CRNK)。各处理磷、钾肥一次基施,施肥量一致,均为 N 200 kg·hm⁻²、P₂O₅ 90 kg·hm⁻²、K₂O 180 kg·hm⁻²。CRN 和 CRNK 处理氮肥一致,由速效氮肥与控释氮肥掺混而成,含氮量分配为速效氮:PCU 控释氮:PSCU 控释氮=4:3:3。CRNK 处理钾肥由硫酸钾和控释氯化钾(CRK)组成,钾肥用量为硫酸钾:CRK=1:1。

试验为田间小区试验,小区面积 220 m²(长 22 m,宽 10 m),每个处理 3 次重复,各小区田间随机排列。2014 年和 2015 年两年田间管理时期一致,每年 4 月 15 日棉花土钵育苗;5 月 10 日将棉花幼苗移植到田间,行距为 1.1 m,株距为 30 cm;棉花施肥沟距离棉花根系 5~10 cm,6 月 8 日施肥后起垄埋深 10~15 cm。7 月 20 日 CU 处理追肥,8 月 4 日打顶。10 月 10 日棉花拔秆收获。灌溉时各小区用小型喷灌带单独浇水,保证浇水量一致,减少因灌、排水造成养分移动所引起

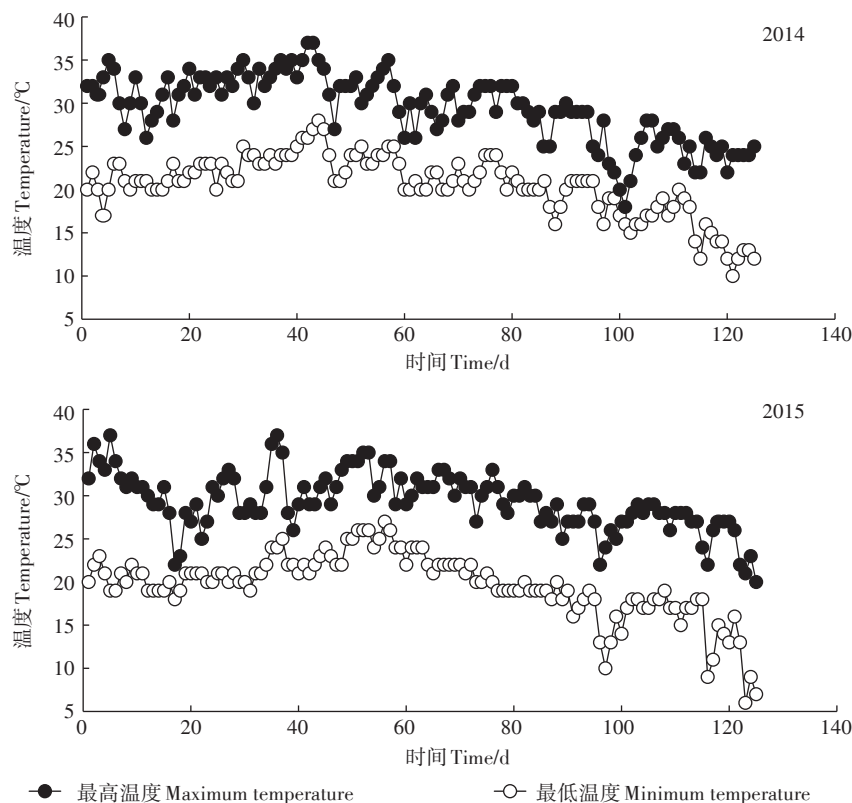


图1 棉花生长期气温变化

Figure 1 Temperature changes at cotton growth stage

的差异。棉花生长过程中其他田间管理措施和当地农民习惯相同,各处理管理措施一致。

1.3 样品采集与分析

棉花收获时各小区选取相邻两行统计连续20株成铃数;采集成熟棉絮100朵,风干后测定并计算单铃质量;用皮辊机轧花后测定棉花衣分;根据成铃数、单铃质量和衣分含量,计算棉花产量^[2,13];皮棉品质由农业部棉花品质监督检验测试中心(河南安阳)测定。

2015年棉花收获时各小区采用5点采样法(肥料行2个采样点,棉花行间2个采样点,株间1个采样点)采集0~100 cm土壤样品,每20 cm为一层,共采集5层样品。部分鲜土即刻测定土壤硝态氮、铵态氮含量($0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$ 浸提,AA3连续流动分析仪测定),剩余土壤自然风干,研磨过2 mm和0.25 mm筛,测定有机质(重铬酸钾外加热法)、土壤全氮(半微量开氏法)、有效磷($\text{pH } 8.5, 0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$ 浸提,钼蓝比色法)和速效钾含量($1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NH}_4\text{OAc}$ 浸提,火焰光度计法)。硫加树脂包膜尿素、树脂包膜控释尿素和树脂包膜氯化钾25℃静水释放曲线,根据中华人民共和国化工行业标准《控释肥料》(HG/T 4215—

2011)中有关控释肥的测定方法测定。田间养分释放特征采用土壤埋袋法测定^[14]。

1.4 数据处理

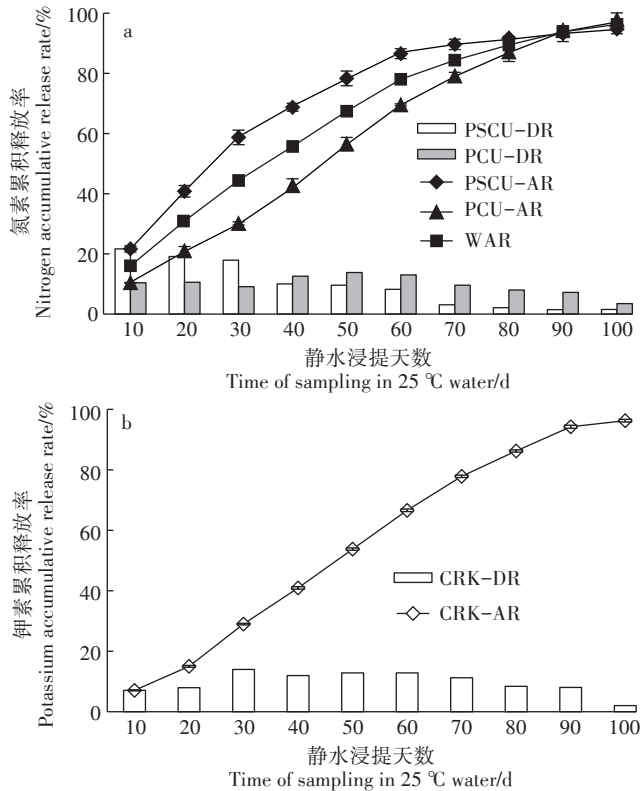
通过Excel 2003和SAS 8.0完成相关数据的处理及统计分析,通过方差分析(ANOVA)比较不同处理间的差异显著性($\alpha=0.05$),并用Excel 2003软件完成作图。

2 结果与分析

2.1 控释氮肥和控释钾肥养分释放特征

2.1.1 静水养分释放特征

在25℃静水中,PSCU养分呈“倒L”型释放,PCU呈直线型释放(图2a)。PSCU显示出前期释放速率快后期下降的趋势,而PCU则呈现出前期释放慢后期增加的趋势。PSCU和PCU分别在60、80 d养分释放量大于80%(图2),可见两种控释氮肥的释放周期分别为两个月和三个月。PSCU前期(前30 d)释放氮素多(图2a),PCU中期释放氮素多,二者结合能够保证棉花生长过程中一直有充足的氮素供应。两种肥料的剩余养分暂存于土壤中,可为后季作物持续提供氮



DR-培养时段释放率;AR-累积释放率;WAR-氮素加权累积释放率。下同
DR-N release rate at different incubation time intervals; AR-Accumulated N release rate; WAR-Weighted accumulating N release rate. The same below

图2 控释氮肥(a)和控释钾肥(b)在25 °C静水中养分释放特征
Figure 2 Nutrient release rate of PCU(a), PSCU(a) and CRK(b) in water

素。在25 °C静水中,CRK为直线型释放(图2b),10~90 d养分释放速率保持平稳,90 d之后养分释放进入减衰期。CRK在80 d养分释放量达86.23%,其养分释放期为三个月。

2.1.2 田间养分释放特征

在土壤中,PSCU养分呈“倒L”型释放,PCU呈“S”型释放(图3a),田间养分释放期分别为65、86 d。PSCU显示出前期释放速率快后期下降的趋势,而PCU则呈现出前期释放慢后期增加再降低的趋势。CRK田间养分释放特征为直线型释放(图3b),释放期为82 d,10~60 d内释放速率较缓慢,60~100 d内呈上升趋势,100~120 d为养分的减衰期。

2.1.3 静水及田间养分释放特征相关性

通过25 °C恒温静水浸提与田间土壤实测法进行比较,可为控释肥养分释放特性科学评价提供依据,对于指导控释肥合理施用具有重要意义。在土壤中,PSCU、PCU和CRK养分释放特征总体规律与在

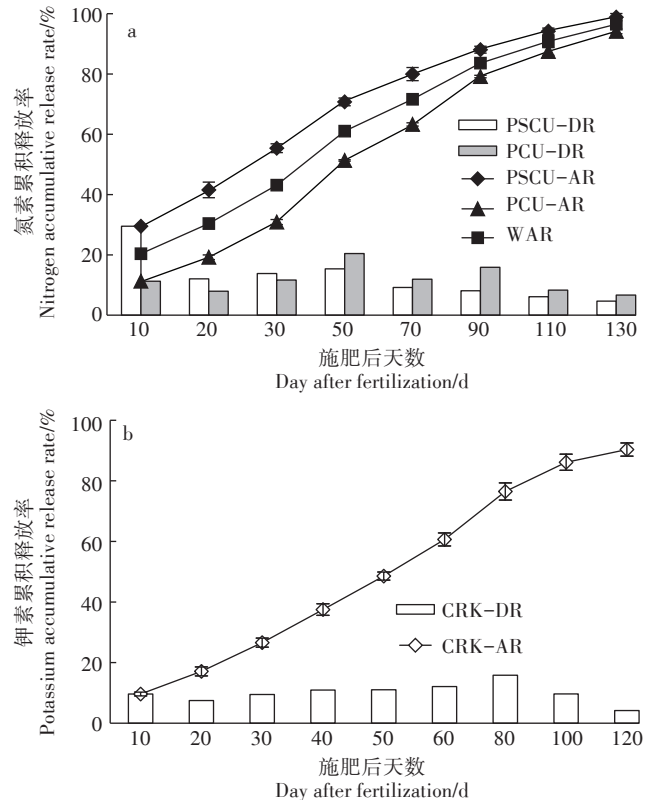


图3 控释氮肥(a)和控释钾肥(b)在土壤中养分释放特征

Figure 3 Nutrient release rate of PCU(a), PSCU(a) and CRK(b) in field

25 °C静水中基本一致(图4),PSCU、PCU和CRK三种养分在土壤中的释放时间均有所延长,分别是25 °C静水中的1.15、1.27倍和1.18倍。控释肥料养分释放率主要受土壤温度的影响,而棉花平均生长温度约为23.5 °C(图1),土温略低于静水浸提的温度,所以田间实测养分释放速率较25 °C静水中慢。

2.2 不同施肥处理对棉花产量的影响

CRN和CRNK处理单铃质量显著高于当地习惯施肥(CK)处理(表1)。两年试验结果均表明,CRNK处理成铃数最高,2014年CRNK处理显著高于CK和CU处理,2015年CRNK成铃数仅显著高于CK。2014年和2015年CRNK处理衣分含量最高,2014年CRNK处理显著高于CK和CU处理。施用控释肥显著提高了皮棉产量,降低了施肥次数,2014年CU处理与CK差异不显著,2015年地力逐渐被消耗,不追肥明显影响棉花产量,控释肥提高棉花产量优势凸显,且CRNK较CRN处理增产2.5%~7.2%。对产量构成要素进行相关性分析(表2),2014年和2015年皮棉产量与棉花单铃质量、成铃数及衣分含量呈显著正相关。控释氮肥和控释钾肥主要通过提高棉花成铃数来提

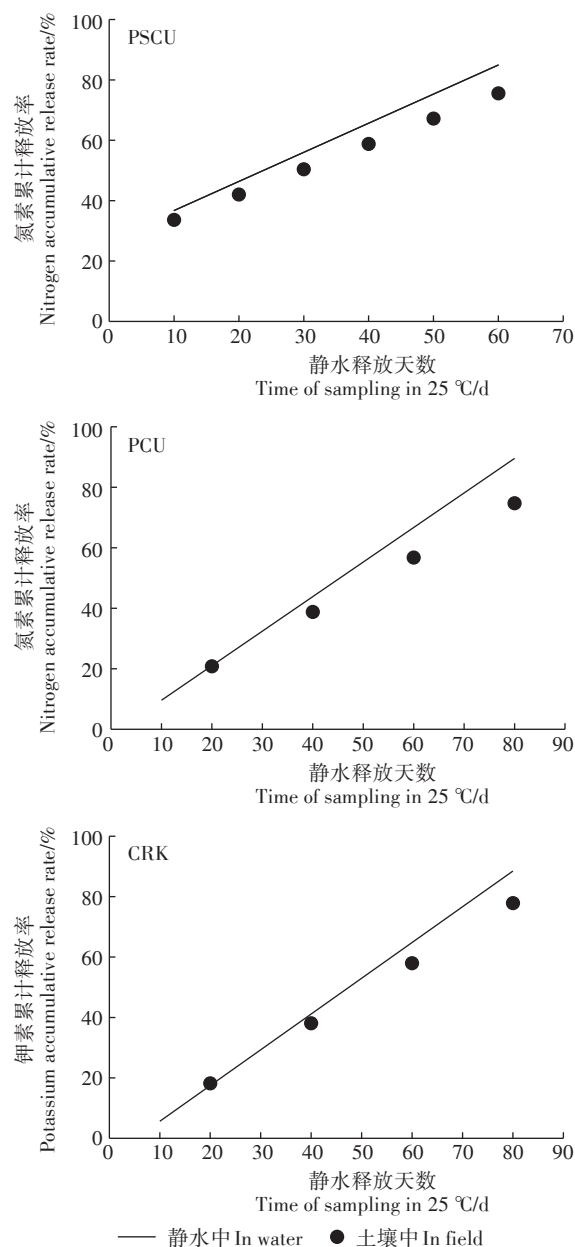


图4 控释肥静水释放和田间释放累积释放率的相关性

Figure 4 The correlation between the release rate in water and field

高棉花产量。

2.3 不同施肥处理对棉花纤维品质的影响

2014年和2015年CRNK处理纤维长度与CK处理差异不显著(表3)。不同施肥处理对整齐度指数、断裂比强度和马克隆值无显著影响,各处理整齐度指数为84.5%~85.7%,断裂比强度和马克隆值分别介于29.1~30.8 $\text{cN} \cdot \text{tex}^{-1}$ 和4.7~4.9。CRNK处理与CRN处理相比,纤维伸长率差异不显著,但显著高于CK处理;CU与CRN处理纤维伸长率均显著高于CK处理,但两处理间无显著差异。

表1 各处理的棉花产量及其构成要素

Table 1 The yield of cotton and its constituent elements under different treatments

年份 Year	处理 Treatments	单铃质量 Boll weight/g	成铃数/ 个·株 ⁻¹ Bolls number/ No·plant ⁻¹	衣分 Lint percentage/%	皮棉产量 Lint yield/ kg·hm ⁻²
2014	CK	6.1±0.1c	30.5±0.3b	40.3±0.1b	1 561.9±16.1b
	CU	6.2±0.1bc	30.5±0.3b	40.5±0.0b	1 579.9±22.7b
	CRN	6.4±0.1ab	33.0±0.6a	41.0±0.0a	1 796.8±12.8a
	CRNK	6.5±0.1a	34.7±1.2a	41.1±0.2a	1 926.2±78.3a
2015	CK	6.2±0.1b	27.3±0.3b	39.1±0.0b	1 377.2±28.9c
	CU	6.5±0.1a	29.3±1.2ab	40.1±0.0a	1 578.1±54.1b
	CRN	6.6±0.1a	31.3±0.3a	40.4±0.2a	1 724.7±32.2a
	CRNK	6.6±0.1a	31.7±0.9a	40.5±0.2a	1 768.6±50.2a

注:同一列同年中不同字母表示差异显著($P>0.05$)。下同。

Note: Means within each column of the same year followed by the different letter were significantly different at the 0.05 probability level. The same below.

表2 各处理的棉花产量与其构成要素的相关性分析

Table 2 Correlation analysis of cotton yield and its constituent elements

年份 Year	产量构成要素 Yield constituent elements	单铃质量 Boll weight	成铃数 Bolls number	衣分 Lint percentage
2014	成铃数 Bolls number	0.750**		
	衣分 Lint percentage	0.643*	0.666*	
	皮棉产量 Lint yield	0.878**	0.973**	0.737**
2015	成铃数 Bolls number	0.730**		
	衣分 Lint percentage	0.760**	0.656*	
	皮棉产量 Lint yield	0.871**	0.968**	0.781**

注:**表示在0.01水平上显著相关;*表示在0.05水平上显著相关。

Note: *, ** indicate significant correlation at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

2.4 不同施肥处理对土壤养分含量的影响

与基础土壤相比,经过两年施肥后各处理0~20 cm土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量有所提高,且0~20 cm土层 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量远高于20~100 cm土壤(表4)。与CK相比,CU、CRN和CRNK处理提高了0~20 cm土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量,但0~20 cm土壤CU和CRN处理差异不显著,说明控释氮肥不追肥条件下仍能使土壤后期维持较高的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量。20~100 cm土层各处理间 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量无显著差异。因旱田土壤中速效氮多以 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的形式存在,因此施肥对 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量的影响高于 $\text{NH}_4\text{-N}$ 。各处理 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量随土层深度的增加而逐渐降低,CRN和CRNK处理显著提高了0~20 cm土壤 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量。

表3 不同施肥处理棉花纤维品质

Table 3 Fiber quality as affected by different treatments

年份 Year	处理 Treatments	纤维长度 Length/mm	整齐度指数 Uniformity/%	断裂比强度 Strength/cN·tex ⁻¹	马克隆值 Micronaire	伸长率 Elongation/%
2014	CK	28.7±0.3a	84.5±0.3a	29.7±0.4a	4.9±0.0a	7.0±0.1b
	CU	29.2±0.5a	84.8±0.1a	30.5±0.6a	4.9±0.2a	7.4±0.2a
	CRN	29.8±0.7a	84.8±0.3a	30.2±0.5a	4.8±0.1a	7.5±0.1a
	CRNK	29.9±0.8a	84.8±0.2a	30.8±0.8a	4.8±0.0a	7.7±0.1a
2015	CK	28.3±0.7a	84.6±0.2a	29.1±0.5a	4.8±0.1a	6.9±0.1b
	CU	28.6±0.5a	84.5±0.4a	29.2±0.3a	4.7±0.1a	7.3±0.2a
	CRN	29.4±0.2a	85.0±0.1a	30.0±0.4a	4.7±0.0a	7.5±0.3a
	CRNK	29.6±0.3a	85.7±0.4a	30.1±0.6a	4.7±0.1a	7.7±0.1a

表4 2015年收获期0~100 cm土层土壤NO₃-N和NH₄⁺-N含量(mg·kg⁻¹)Table 4 Soil NO₃-N and NH₄⁺-N contents of different treatments at 0~100 cm during harvest in 2015(mg·kg⁻¹)

项目 Items	处理 Treatments	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	60~80 cm	80~100 cm
NO ₃ -N	CK	22.6±0.5b	18.8±0.4a	11.4±0.5a	10.2±0.1a	9.7±0.0a
	CU	27.8±0.3a	16.8±1.2a	10.8±0.1a	10.0±0.2a	9.2±0.1a
	CRN	29.7±1.6a	17.8±0.6a	11.0±0.0a	10.2±0.2a	9.0±0.1a
	CRNK	31.3±1.3a	17.6±0.3a	11.0±0.1a	10.1±0.4a	9.3±0.2a
NH ₄ ⁺ -N	CK	7.8±0.2b	6.2±0.6a	6.4±0.4a	6.5±0.3a	5.6±0.2a
	CU	8.4±0.2ab	6.3±0.3a	6.8±1.3a	6.2±0.3a	5.6±0.4a
	CRN	8.8±0.3a	7.1±0.1a	6.7±0.8a	6.1±0.5a	5.7±0.6a
	CRNK	9.0±0.2a	7.3±0.8a	6.1±0.2a	6.5±0.2a	5.2±0.3a

由于棉花根系主要分布在土壤上部土体层(0~40 cm),0~20 cm土壤中较高的NO₃-N和NH₄⁺-N含量有利于棉花根系的吸收,说明控释氮肥有利于提高棉花后期氮素吸收。土壤深处尤其在60 cm以下土层各处理NO₃-N和NH₄⁺-N含量差异不显著。

各施肥处理0~20 cm土壤有机质和全氮含量较基础土壤均有所增加,增幅分别为2.65%~3.97%和2.56%~5.13%(表5)。这主要是由于施肥方式为条施,样品采集时在肥料行上设有采样点。各处理0~20 cm土壤有机质含量最高,在20~40 cm处含量锐减,60~100 cm土层含量较为稳定,并且各处理之间有机质含量无显著差异。与CK处理相比,CRN和CRNK处理均提高了0~20 cm土壤有机质和全氮含量,是因为控释肥处理在提高棉花产量和干物质积累的同时,也增加了植株残留量,从而增加了有机质含量。20~100 cm各处理间有机质和全氮含量差异不显著,因作物植株残留主要集中在表层土壤,很难进入20 cm以下土壤。

土壤有效磷含量在0~100 cm土层间,随深度增加而逐渐降低(表6)。CK处理0~20 cm土壤有效磷

含量显著高于CU处理,其余处理间无显著差异。20~100 cm土层中,各处理有效磷含量差异不显著。各处理0~20 cm表层土壤速效钾的含量最高,20 cm土层下随深度增加而减少。CRNK处理0~20 cm土壤速效钾含量最高,较其他处理显著增加1.4%~8.9%,CRNK与CRN处理差异不显著,但是CRNK处理20~40 cm土壤速效钾含量显著高于CRN,说明控释氯化钾养分的缓慢释放能够有效提高土壤速效钾含量。

2.5 不同施肥处理对棉花经济效益的影响

控释氮肥和控释钾肥对棉花经济效益存在不同程度的影响(表7)。CU处理总收入较CK处理显著增加,但CU处理需要追肥,增加人力投入,经济效益无显著差异。CRN处理氮肥一次基施与CU处理相比,虽提高了肥料投入,但可减少人力投入,经济效益提高36.3%。CRNK处理控释氮肥和控释钾肥一次基施,经济收益最高,较CU处理提高49.9%。

3 讨论

氮素是影响棉花产量和品质的关键因素之一。棉花对氮素的利用率会随着棉花生育期的进程,呈现

表5 2015年收获期0~100 cm土层土壤有机质和全氮含量(g·kg⁻¹)

Table 5 Soil organic matter and total N contents of different treatments at 0~100 cm during harvest in 2015(g·kg⁻¹)

项目 Items	处理 Treatments	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	60~80 cm	80~100 cm
有机质	CK	15.5±0.2a	11.6±0.5a	7.6±0.3a	6.1±0.1a	5.6±0.1a
	CU	15.5±0.1a	11.6±0.3a	7.3±0.0a	6.1±0.2a	5.6±0.0a
	CRN	15.7±0.2a	11.3±1.0a	7.1±0.3a	6.2±0.1a	5.6±0.2a
	CRNK	15.6±0.1a	11.7±0.2a	7.4±0.0a	6.1±0.1a	5.6±0.2a
全氮	CK	0.80±0.01b	0.60±0.02a	0.42±0.01a	0.34±0.01a	0.31±0.00a
	CU	0.81±0.02a	0.60±0.02a	0.40±0.01a	0.33±0.01a	0.31±0.00a
	CRN	0.82±0.01a	0.60±0.01a	0.39±0.01a	0.34±0.01a	0.30±0.01a
	CRNK	0.82±0.00a	0.59±0.01a	0.41±0.01a	0.34±0.00a	0.31±0.01a

表6 2015年收获期0~100 cm土壤有效磷和速效钾含量(mg·kg⁻¹)

Table 6 Available P and available K concentration of different treatments at 0~100 cm during harvest in 2015(mg·kg⁻¹)

项目 Items	处理 Treatments	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	60~80 cm	80~100 cm
有效磷	CK	39.8±0.8a	22.1±0.8a	11.2±0.7a	7.7±0.2a	7.5±0.5a
	CU	34.4±2.5b	23.0±0.3a	11.2±0.3a	7.5±1.0a	7.8±0.3a
	CRN	36.8±0.9ab	22.1±0.3a	11.0±0.8a	7.2±0.3a	7.6±0.2a
	CRNK	37.9±1.5ab	21.5±0.1a	10.4±0.5a	7.9±0.2a	7.6±0.3a
速效钾	CK	128.8±1.7b	104.3±1.6b	87.0±1.9a	93.8±2.0a	90.1±1.4a
	CU	127.3±0.4b	102.1±0.2b	83.0±0.8a	93.1±3.0a	87.4±2.2a
	CRN	138.4±2.9a	103.6±1.3b	88.6±2.9a	89.5±1.4a	91.0±3.8a
	CRNK	140.3±1.7a	114.3±1.2a	89.6±1.6a	90.8±1.8a	89.9±0.9a

表7 不同处理经济收益(元·hm⁻²)

Table 7 Economic benefit of different treatments(yuan·hm⁻²)

处理 Treatments	总收入 Total income	肥料投入 Fertilizer expense	人力投入 Labor expense	其他投入 Other expense	经济效益 Economic benefit	较CK增收/% Rate of net profit
CK	21 896±235c	2148	4200	6400	9148±235b	—
CU	23 527±410b	2148	5250	6400	9729±409b	6.4
CRN	26 235±315a	2379	4200	6400	13 256±315a	44.9
CRNK	27 526±637a	2340	4200	6400	14 586±637a	59.4

注:总收入为2014年和2015年的平均收入;皮棉价格为14.9元·kg⁻¹;尿素、PCU、PSCU、磷酸二铵、硫酸钾和控释氯化钾肥料价格分别为1560、2400、2300、2600、2480、2400元·t⁻¹;劳动成本为每人70元·d⁻¹,人工追肥成本为1050元·hm⁻²;其他费用包括种子、农药、土地、灌溉及机械等。

Note: Total income was the average for 2014 and 2015; The average price of lint cotton was 14.9 yuan·kg⁻¹; The fertilizer expense: Urea-1560 yuan·t⁻¹, PCU-2400 yuan·t⁻¹, PSCU-2300 yuan·t⁻¹, DAP-2600 yuan·t⁻¹, potassium sulfate-2480 yuan·t⁻¹, CRK-2400 yuan·t⁻¹; The labor cost was 70 yuan per person per day, labor cost of fertilization for one time was 1050 yuan·hm⁻²; Other cost included seeds, irrigation, pesticide, insecticide, machinery, other materials and expenses.

不规则的“S”型曲线的变化趋势^[15]。因此,通过合理施肥实现土壤养分供应与养分需求相同步是棉花高产优质的重要保证^[16]。本研究所用控释氮肥能够平稳而持续地供给棉花氮素,且控释氮肥一次基施(CRN)和控释氮、钾肥一次基施(CRNK)的速效氮含量均高于尿素追施(CU)处理,说明控释氮肥可以做到持续为棉花生长提供氮素,满足了棉花养分吸收高峰期(开花期至吐絮期^[9,17])养分需求,从而提高了产量。另外,棉花植株追肥时期多为开花期至吐絮期,

棉花植株高大、果枝数多,追肥不仅增加人力投入,还会损伤棉铃,而控释氮肥一次基施,可节省人力,减少对棉花生长过程的干扰。

棉花需钾量高,是典型的喜钾作物,钾素对棉花产量和纤维品质的形成起着关键作用。我国棉花生产过程中钾肥以硫酸钾和氯化钾为主,其中硫酸钾(含K₂O 50%)价格较高、钾素含量相对较低,但效果优于氯化钾^[18]。而硫酸钾和氯化钾等速效肥料容易转化为非交换性或固定态钾,导致土壤钾素有效性降

低。本研究结果表明,采用硫酸钾与控释氯化钾1:1掺混一次基施的施用方式,CRNK处理较CU处理提高了0~20 cm和20~40 cm土壤速效钾含量,这是由于控释氯化钾具有缓慢释放钾素的特点,两者掺混能够较好地与棉花各生长阶段对钾素养分的需求速度相吻合,保证后期耕层土壤对棉花生长所需钾素的供应,同时降低成本,提高经济效益。

控释氮肥和控释钾肥一次基施,氮钾之间相互促进^[19],有利于提高棉花产量。同时,CRNK处理0~20 cm土壤有效磷含量较CK显著降低,这可能是控释肥料提高了棉花生物量并增加了土壤有效磷的吸收,从而降低土壤有效磷含量^[20]。另外,耿计彪等^[11]研究表明控释氮肥提高棉花产量的主要原因是提高了单铃质量;Tian等^[13]的研究结果则表明控释钾肥能够有效提高成铃数。本研究结果表明棉花产量与单铃质量、成铃数及衣分含量呈显著正相关,控释氮肥和控释钾肥主要通过提高成铃数来提高棉花产量。因此,控释氮肥和控释钾肥配合基施,可满足棉花不同生长时期对氮素和钾素的需求,既减少用工,又增加经济效益,具有广阔的应用前景。但关于控释氮肥和控释钾肥配合施用对棉花生长的作用机制和控释氮肥与钾肥的交互效应还有待进一步研究。

4 结论

(1)本试验条件下,控释氮、钾肥在棉花生育期田间养分释放较25℃静水浸提检测的养分释放期相对延长,可满足棉花整个生育期对氮、钾素的需求,省工增效。

(2)控释氮肥和控释钾肥一次基施较基施尿素处理显著提高了棉花收获期0~20 cm土壤全氮、硝态氮和速效钾含量,从而显著提高棉花成铃数和单铃质量及伸长率。

(3)与尿素基施加追施处理相比,控释氮肥一次性基施显著提高棉花产量9.3%~13.7%,两年平均提高经济效益36.3%;控释氮肥和控释钾肥一次性基施,棉花显著增产12.1%~21.9%,两年平均提高经济效益达49.9%。

参考文献:

- [1] 李鹏程,董合林,刘爱忠,等.施氮量对棉花功能叶片生理特性、氮素利用效率及产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(1):81-91.
- LI Peng-cheng, DONG He-lin, LIU Ai-zhong, et al. Effects of nitrogen

- application rates on physiological characteristics of functional leaves, nitrogen use efficiency and yield of cotton[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(1):81-91.
- [2] 付小勤,原保忠,刘燕,等.钾肥施用量和施用方式对棉花生长及产量和品质的影响[J].农学学报,2013,3(2):6-11,16.
- FU Xiao-qin, YUAN Bao-zhong, LIU Yan, et al. Effects of rate and way of potassium application on biomass and yield and fiber quality of cotton[J]. *Journal of Agriculture*, 2013, 3(2):6-11, 16.
- [3] 邹芳刚,郭文琦,王友华,等.施氮量对长江流域滨海盐土棉花氮素吸收利用的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(5):1150-1158.
- ZOU Fang-gang, GUO Wen-qi, WANG You-hua, et al. Effects of nitrogen application rate on the nitrogen uptake and utilization of cotton grown in coastal saline fields of Yangtze River Valley[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(5):1150-1158.
- [4] Hu W, Zhao W, Yang J, et al. Relationship between potassium fertilization and nitrogen metabolism in the leaf subtending the cotton (*Gossypium hirsutum* L.) boll during the boll development stage[J]. *Plant Physiology & Biochemistry*, 2016, 101:113-123.
- [5] 耿计彪,张民,李成亮,等.控释氮肥对盆栽棉花产量及土壤养分状况的影响[J].棉花学报,2015,27(5):401-407.
- GENG Ji-biao, ZHANG Min, LI Cheng-liang, et al. Effects of controlled-release nitrogen fertilizers on the yield and soil nutrient regime of potted cotton[J]. *Cotton Science*, 2015, 27(5):401-407.
- [6] 张民,陈宝成,李成亮,等.控释肥养分释放与作物养分吸收同步性研究[C].成都:全国磷复肥行业年会,2015.
- ZHANG Min, CHEN Bao-cheng, LI Cheng-liang, et al. The nutrient release of controlled fertilizer and nutrient absorption of crops[C]. Chengdu: National Phosphate Industry Conference, 2015.
- [7] 韩雅娟,朱新萍,杨宝和,等.土壤湿度和机械长度对棉花秸秆分解率的影响[J].农业资源与环境学报,2014,31(1):69-73.
- HAN Ya-jiao, ZHU Xin-ping, YANG Bao-he, et al. Effect of soil moisture and length of cotton straw machinery processing on cotton straw decomposition[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2014, 31(1):69-73.
- [8] 陈剑秋,陈宏坤,张民,等.控释复合肥田间养分释放特征及对土壤硝态氮和铵态氮累积的影响[J].水土保持学报,2011,25(4):110-114,120.
- CHEN Jian-qi, CHEN Hong-kun, ZHANG Min, et al. Nutrient release characteristics of controlled release compound fertilizer in field and its effect on nitrate and ammonium accumulation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(4):110-114, 120.
- [9] Geng J B, Ma Q, Zhang M, et al. Synchronized relationships between nitrogen release of controlled release nitrogen fertilizers and nitrogen requirements of cotton[J]. *Field Crops Research*, 2015, 184:9-16.
- [10] 田晓飞,李成亮,张民,等.控释氮肥对洋葱-棉花套作体系产量及土壤氮含量的影响[J].农业环境科学学报,2015,34(4):745-752.
- TIAN Xiao-fei, LI Cheng-liang, ZHANG Min, et al. Effects of controlled-release nitrogen fertilizer on yields and soil nitrogen in onion-cotton intercropping system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(4):745-752.

- [11] 耿计彪, 马强, 张民, 等. 包膜氯化钾一次基施对棉花生长周期钾素供应、产量及品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(4):1064-1070.
GENG Ji-biao, MA Qiang, ZHANG Min, et al. Effects of complete basal application of coated potassium chloride on yield, fiber quality and soil available potassium of cotton[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(4):1064-1070.
- [12] Tian X F, Li C L, Zhang M, et al. Controlled release urea improved crop yields and mitigated nitrate leaching under cotton-garlic intercropping system in a 4-year field trial[J]. *Soil & Tillage Research*, 2018, 175:158-167.
- [13] Tian X F, Li C L, Zhang M, et al. Effects of controlled-release potassium fertilizer on available potassium, photosynthetic performance, and yield of cotton[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2017, 180:505-515.
- [14] 程冬冬, 窦午红, 赵贵哲, 等. 高分子缓/控释肥氮磷养分释放特征及影响因素研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015(3):484-492.
CHENG Dong-dong, DOU Wu-hong, ZHAO Gui-zhe, et al. Release characteristics of nitrogen and phosphorus from polymeric slow/controlled release fertilizer and its influential factors[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2015(3):484-492.
- [15] 薛晓萍, 沙奕卓, 郭文琦, 等. 棉花蕾花铃生物量、氮累积特征及临界氮浓度稀释模型[J]. 生态学报, 2008, 28(12):6204-6211.
XUE Xiao-ping, SHA Yi-zhuo, GUO Wen-qi, et al. Accumulation characteristics of biomass and nitrogen and critical nitrogen concentration dilution model of cotton reproductive organ[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(12):6204-6211.
- [16] 李宗泰, 陈二影, 宋宪亮, 等. 施钾量和施钾时期对棉花产量及不同部位棉铃纤维品质性状的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(1):123-131.
LI Zong-tai, CHEN Er-ying, SONG Xian-liang, et al. Effects of rate and time of potassium application on yield and fiber quality of cotton (*Gossyium hirsutum* L.) at different fruit positions[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(1):123-131.
- [17] 李成亮, 黄波, 孙强生, 等. 控释肥用量对棉花生长特性和土壤肥力的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(2):295-305.
LI Cheng-liang, HUANG Bo, SUN Qiang-sheng, et al. Effects of application rates of controlled release fertilizers on cotton growing and soil fertility[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(2):295-305.
- [18] Christian Z, Mehmet S, Edgar P. Potassium in agriculture status and perspectives[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2013, 2:1-14.
- [19] 杨修一, 田晓飞, 张娟, 等. 控释氮肥在棉花上的应用研究进展[J]. 棉花学报, 2015, 27(5):481-488.
YANG Xiu-yi, TIAN Xiao-fei, ZHANG Juan, et al. Research advances in the application of controlled release nitrogen fertilizer in cotton production[J]. *Cotton Science*, 2015, 27(5):481-488.
- [20] 张学昕, 刘淑英, 王平, 等. 不同氮磷钾配施对棉花干物质积累、养分吸收及产量的影响[J]. 西北农业学报, 2012, 21(8):107-113.
ZHANG Xue-xin, LIU Shu-ying, WANG Ping, et al. Effects of different fertilizations on cotton dry matter accumulation, nutrients uptake and yield[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2012, 21(8):107-113.