

控释钾肥对大蒜-棉花套作体系产量和土壤钾素供应的影响^{*}

田晓飞 李成亮[†] 张民[†] 郭延乐 张为涛

(土肥资源高效利用国家工程实验室, 国家缓控释肥工程技术研究中心, 山东农业大学资源与环境学院, 山东泰安 271018)

摘 要 于2013–2015年在山东农业大学试验站进行连续3年5季的池栽试验, 以硫酸钾基施(CK1)和氯化钾基施(CK2)为对照, 探究氯化钾50%基施+50%盛花期追施(KCID)、氯化钾配施硫磺基施(KCIS)、控释氯化钾基施(CRK)和控释氯化钾配施硫磺基施(CRKS)对棉花各生育期叶片光合特性和土壤速效钾含量变化以及蒜棉套作体系产量的影响, 为棉花合理施用钾肥提供理论依据。结果表明, 控释氯化钾在土壤中养分释放能够满足棉花各生育期钾素需求。CRKS较普通钾肥基施处理提高了铃期和始絮期土壤速效钾含量, 提高了铃期后叶片SPAD值和净光合速率, 增加了成铃数和单铃重, 皮棉显著增产16.9%~30.9%。CRKS较KCID和CRK皮棉分别增产12.2%~16.1%和8.7%~10.4%。大蒜蒜薹和鳞茎产量均以CRKS最高, 较其余处理分别增产2.8%~27.9%和4.8%~23.5%。CRKS较CK2显著提高了纤维长度、整齐度指数和伸长率。经过3年施肥后, CRKS较普通钾肥基施显著提高了土壤水溶性钾和非特殊吸附钾含量。因此, 控释氯化钾配施硫磺在棉花上一次基施代替硫酸钾和氯化钾提高了棉花生长后期土壤钾素供应和有效性, 改善了叶片光学特性, 提高了棉花产量和品质。

关键词 控释氯化钾; 棉花; 光合特征; 品质; 钾素有效性

中图分类号 S143.3 **文献标识码** A

钾肥在棉花产量构成和品质改善方面起着重要作用^[1]。合理施用钾肥能防止叶片早衰^[2], 改善纤维长度和提高成熟度^[3], 从而获得高产优质棉花。但棉花植株高大, 后期追肥困难, 农业生产中通常将钾肥作为基肥一次施入。研究表明, 棉花的干物质积累高峰出现在盛花期至成熟期^[4]。氯化钾和硫酸钾等传统速效钾肥在土壤易被固定或转化为有效性较低的非交换态钾和固定态钾^[5]或随雨水淋溶或地表径流损失, 导致棉花后期因缺钾而早衰^[6]。虽然钾肥追施能够提高成棉花产量^[7], 但

增加了人力投入, 同时追肥过程中还容易毁坏棉株根系和果枝。因此, 寻求合理的钾肥施用方式是降低农业投入, 实现棉花轻简化生产的有效途径。

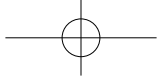
我国棉花生产中钾肥主要以硫酸钾和氯化钾为主, 作为基肥一次施入导致钾素的供应与棉花的需钾规律不同步^[8], 造成钾肥的浪费。近年来, 棉花与粮食、蔬菜等作物争地矛盾逐渐加剧, 大蒜-棉花套作能够有效解决这一矛盾, 种植面积逐渐增加^[9]。施用硫肥能够有效提高棉花产量^[10], 改善大蒜品质^[10], 因此在大蒜-棉花套作模式下钾

^{*} 国家“948”重点项目(2011-G30)、国家自然科学基金项目(41571236)和国家重点研发计划(SQ2047ZY060105, SQ2017ZY060020)共同资助 Supported by the Key Projects in the National “948” Program during the Twelfth Five-year Plan Period (No. 2011-G30) and the Natural Science Foundation of China (No. 41571236) and the National key Research and Development program of China (SQ2017ZY060105, SQ2017ZY 060020)

[†] 通讯作者 Corresponding authors, E-mail: chengliang_li11@163.com; minzhang-2002@163.com

作者简介: 田晓飞(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事新型肥料研发方面的工作。E-mail: tianxiaofei624@163.com

收稿日期: 2016-12-12; 收到修改稿日期: 2017-03-30; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2017-05-02



肥以价格高、含钾量低的硫酸钾为主。目前针对钾肥合理施用提高棉花产量和品质已经进行了大量研究,但多集中在普通钾肥(硫酸钾、氯化钾以及硝酸钾等)施肥用量和施肥方式上^[11-12],针对控释氯化钾配施硫磺替代硫酸钾和氯化钾在棉花上的应用尚少见报到。因此,本研究在大蒜-棉花套作模式下,于2013—2015年通过连续3年5季的池栽试验,探究控释氯化钾配施硫磺替代硫酸钾和氯化钾对棉花叶片光合特性、土壤钾素供应和棉花产量的影响,为棉花合理施用钾肥提供理论依据,同时也为后续硫包膜控释钾肥的研发提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2013年4月至2015年10月在山东省泰安市山东农业大学南校区试验站进行(117°09 E, 36°15 N)。试验小区为1 m³(长宽高均为1 m)的水泥池,其中下部20 cm为河沙,上部80 cm土壤为棕壤,在中国土壤系统分类中为普通简育湿润淋溶土(Typic-Hapli-Udic Argosols),土壤pH(土水比1:2.5)7.30;有机质16.64 g kg⁻¹;全氮1.13 g kg⁻¹;硝态氮27.69 mg kg⁻¹;铵态氮14.20 mg kg⁻¹;有效磷36.10 mg kg⁻¹;速效钾93.20 mg kg⁻¹;水溶性氯29.45 mg kg⁻¹;有效硫20.25 mg kg⁻¹。

棉花供试品种为中早熟的“鲁棉研28”,大蒜供试品种为“金乡白皮蒜”,两者均是蒜套棉区应用最广泛的品种。供试肥料包括大颗粒尿素(N 46%)、树脂包膜尿素(橘红色, N 42%)、磷酸二铵(P₂O₅ 46%; N 18%)、氯化钾(K₂O

60%)、硫酸钾(K₂O 50%, S 17.5%)、树脂包膜氯化钾(绿色, K₂O 52.3%)和硫磺粉(S 95%)。包膜尿素和包膜氯化钾由国家缓控释肥工程技术研究中心中试车间制备,养分释放期均为三个月。

1.2 试验设计

试验设6个处理:(1)硫酸钾基施(CK1);(2)氯化钾基施(CK2);(3)氯化钾和硫磺基施(KCIS);(4)氯化钾基施50%,盛铃期追施50%(KCID);(5)控释氯化钾基施(CRK);(6)控释氯化钾和硫磺基施(CRKS),每个处理重复3次。试验共设21个水泥池,其中18个水泥池用于以上6个处理的池栽试验,另外3个用于埋袋测定控释氯化钾的养分释放率。各处理氮磷钾肥施入量相同,分别为220-90-180(N-P₂O₅-K₂O) kg hm⁻²,具体肥料类型及用量列于表1中。KCIS和CRKS处理硫磺粉施硫量与CK1处理中硫酸钾含硫量相等。各处理氮磷肥和硫磺粉均一次性基施。

试验采用大蒜-棉花套种模式,从2013年4月棉花种植开始,至2015年10月棉花收获结束,共进行3年5季,其中第1、3、5季种植棉花,第2、4季种植大蒜,为避免大蒜季施肥对试验结果的影响,大蒜季施肥与棉花施肥量一致。同时为避免多次取土影响棉花生长,仅在2015年棉花生长过程中采集土壤样品。每年的4月中旬棉花土钵育苗,5月上旬将棉花幼苗移栽入大蒜行间,每小区呈品字形移栽3株;6月上旬大蒜收获后进行棉花施肥,施肥方式为穴施,分别在棉苗一侧开深度为15~20 cm的3个穴,将肥料施入穴中覆土;7月下旬打顶;10月中旬棉花吐絮采收后,拔出后进行大蒜施肥,采用开沟条施,施肥深度为15~20 cm;大蒜播种行

表1 试验方案和施肥量

Table 1 Scheme and doses of fertilizers (kg hm⁻²)

处理 Treatment	施肥量 N-P ₂ O ₅ -K ₂ O	尿素 Urea	控释尿素 CRU	磷酸二铵 DAP	氯化钾 Potassium chloride	硫酸钾 Potassium sulfate	控释氯化钾 CRK	硫磺 Sulfur
CK1	220-90-180	162	261	195	-	360	-	-
CK2	220-90-180	162	261	195	300	-	-	-
KCIS	220-90-180	162	261	195	300	-	-	68
KCID	220-90-180	162	261	195	150(基施) 150(追施)	-	-	-
CRK	220-90-180	162	261	195	-	-	344	-
CRKS	220-90-180	162	261	195	-	-	344	68

注: CRU, Controlled release urea; DAP, Diammonium phosphate; CRK, Controlled release potassium chloride

距20 cm, 株距10 cm, 每小区种植45颗; 拔出的棉花植株按小区编号放置在水泥池旁, 待棉花在11月中旬全部吐絮后完成收获。各小区整个生育期管理保持一致。

1.3 测定项目及方法

控释氯化钾在25℃静水释放, 根据中华人民共和国化工行业标准《控释肥料》“HG/T 4215-2011”^[13]中有关控释肥的测定方法测定。控释氯化钾在土壤中释放, 于2015年采用埋袋称重法测定, 步骤为称取10 g控释氯化钾颗粒装入长10 cm, 宽8 cm的尼龙网袋中, 在施肥时埋入水泥池中, 埋深15~20 cm。分别在埋袋后第10、20、30、40、60、80、100、120 d 采集网袋, 每次采集3袋, 将肥料颗粒表面土壤洗净后60℃烘干至恒重, 依据剩余肥料颗粒质量计算养分释放速率^[14]。

依棉花吐絮情况, 每年均采摘5~6次, 全部风干后称重记产, 计算单铃重。将采摘的棉花充分混匀后选取部分样品轧取皮棉, 计算衣分含量; 轧出的皮棉由农业部棉花品质监督检验测试中心(河南)测定纤维马克隆值、纤维长度、整齐度指数、伸长率和断裂比强度。大蒜蒜薹和鳞茎收获时各小区全部收获, 鳞茎收获时从鳞茎膨大处向上2 cm位置剪断, 去除根系后称量。

2015年棉花各时期采用Li-6400XT便携式光合速率仪测定功能叶片(主茎倒四叶)净光合速率, 采用SPAD-502测定叶片叶绿素读数。测定时间分别为现蕾期(6月10日, 施肥前), 初花期(7月17日)、盛花期(8月6日)、盛铃期(8月26日)、始絮期(9月10日)和成熟期(10月10

日, 拔杆收获)。测定完叶片光学特性后使用土钻($\Phi=2$ cm)采集0~20 cm土壤三钻, 混匀风干磨细后供分析化验用。土壤速效钾用1 mol L⁻¹ 醋酸铵提取; 土壤水溶性钾按水土比10:1用蒸馏水提取; 非特殊吸附钾用0.5 mol L⁻¹中性醋酸镁溶液提取, 非特殊吸附性钾=醋酸镁浸提钾-水溶性钾; 土壤特殊吸附钾用1 mol L⁻¹中性醋酸铵溶液提取, 特殊吸附钾=醋酸铵浸提钾-醋酸镁浸提钾; 非交换性钾用1 mol L⁻¹ 硝酸溶液煮沸提取, 非交换性钾=硝酸消煮钾-醋酸铵浸提钾; 矿物钾=全钾-硝酸消煮钾; 全钾用氢氟酸-高氯酸消煮法提取; 各提取液中的钾稀释后均用火焰光度法测定^[5]。

1.4 数据处理

试验数据分析处理和作图采用Microsoft Excel 2007软件, 并用SAS 8.0统计软件进行处理间差异显著性分析($p<0.05$)及ANOVA方差分析。

2 结 果

2.1 控释氯化钾养分释放特征

在25℃静水中, CRK在前90 d养分释放速率呈直线型释放, 平均日释放速率为1%, 之后钾素释放速率逐渐降低(图1a)。所用CRK在83 d时, 养分累计释放率达到80%。在土壤中CRK与25℃静水中释放速率趋势基本一致(图1b), 但平均日释放速率低于25℃静水。这与棉花生长过程中平均气温低于25℃有关(图2)。对于阶段释放率而言, 在30~40 d较高, 之后时段释放率逐渐稳定。在棉花收获时, CRK在土壤中累积释放了90.3%, 剩余养

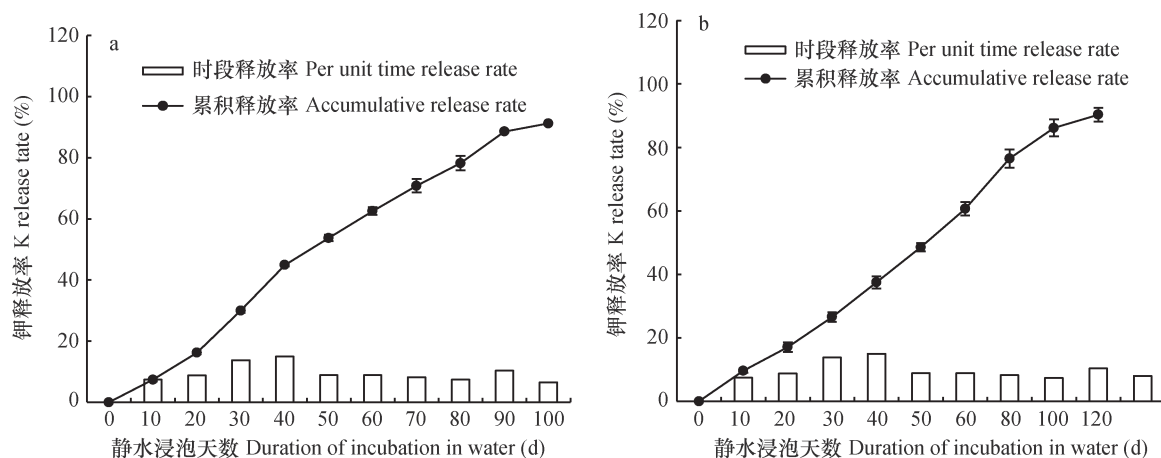


图1 控释氯化钾在25℃静水(a)和土壤中(b)释放特征

Fig. 1 K release characteristics of controlled release potassium chloride (CRK) in 25°C water (a) and soil (b)

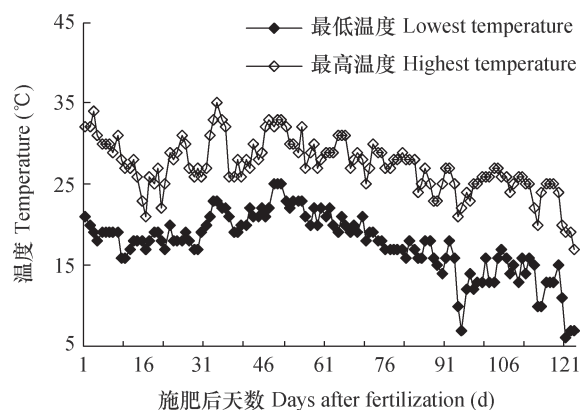


图2 2015年棉花施肥后气温变化

Fig. 2 Variation of air temperature after fertilization during the cotton growth period in 2015

分残留在膜内可供下季作物生长。

2.2 不同钾肥处理对土壤钾素供应和有效性的影响

在2015年棉花现蕾期（施肥前），CRK和CRKS处理土壤中速效钾含量显著高于CK1和CK2处理（表2），一方面是由于在上一季大蒜生产中未释放完全的钾素继续释放，另一方面在大蒜-棉

花套种模式下，棉花生长前期（大蒜收获期）浇水较多，加剧了钾素的淋溶损失，而CRK随作物生长需求释放，土壤含水量增加促进了CRK养分释放，提高了土壤速效钾含量。经过3年5季施肥后，在初花期时，CK1和CK2处理土壤速效钾含量显著高于CRK和CRKS处理，随后呈下降的趋势；KCID处理在铃期追肥之后速效钾含量上升，但是速效钾含量与CRK和CRKS处理差异不显著。CRK处理土壤速效钾含量相对各普通钾肥一次基施处理变化平稳，自盛花期以后显著高于CK1、CK2和KCIS处理，使土壤具有持续充足的钾供应量，为棉花需钾高峰期提供了更为充足的钾素营养。

经过3年5季施肥后，不同处理土壤中各形态钾均呈现矿物钾 > 非交换性钾 > 特殊吸附钾 > 非特殊吸附钾 > 水溶性钾的趋势（表3）。KCID、CRK和CRKS处理较CK1、CK2和KCIS处理显著提高了0-20 cm土壤水溶性钾和非特殊吸附钾含量，显著降低了土壤非交换性钾含量，但各处理土壤非特殊吸附钾和矿物钾含量差异不显著。

表2 棉花生育期各处理土壤速效钾含量变化

Table 2 Variation of soil available K content in the soil during the cotton growing period relative to treatment (mg kg⁻¹)

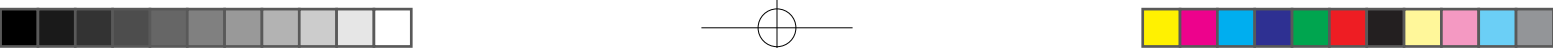
处理 Treatment	现蕾期 Squaring	初花期 Initial bloom	盛花期 Full bloom	铃期 Boll bearing	始絮期 Initial boll-opening	成熟期 Mature
CK1	101.0b	147.9a	134.0a	122.8b	117.7b	107.2b
CK2	99.40b	155.7a	135.6a	124.1b	114.7b	109.5b
KCIS	102.5b	154.2a	135.6a	126.9b	118.1b	108.7b
KCID	113.5a	126.0b	129.1a	135.6a	130.6a	135.6a
CRK	118.2a	113.5c	127.5a	138.7a	133.0a	127.9a
CRKS	119.7a	115.0c	127.5a	137.4a	136.6a	124.3a

注：同一列中平均值后标有相同小写字母表示差异不显著 ($p < 0.05$) Note: Means followed by the same lowercase letters in the same column are insignificant in difference ($p < 0.05$)

表3 2015年棉花收获后各处理土壤钾素形态

Table 3 Forms of soil potassium after cotton harvested in 2015 relative to treatment

处理 Treatment	水溶性钾 Water-soluble K (mg kg ⁻¹)	非特殊吸附钾 Non-specifically adsorbed K (mg kg ⁻¹)	特殊吸附钾 Specifically adsorbed K (mg kg ⁻¹)	非交换性钾 Non-exchangeable K (mg kg ⁻¹)	矿物态钾 Mineral K (g kg ⁻¹)
CK1	20.04b	41.73b	55.89a	1 004a	23.57a
CK2	18.81b	42.96b	52.89a	997.9a	23.56a
KCIS	20.45b	41.32b	56.36a	1 013a	23.59a
KCID	23.32a	47.07a	60.24a	972.6b	23.59a
CRK	23.73a	46.66a	62.57a	932.7b	23.60a
CRKS	24.96a	48.66a	62.98a	947.8b	23.64a



2.3 不同钾肥处理对棉花功能叶片叶绿素和光合特性的影响

2015年各处理SPAD值在初花期和盛花期最高，之后逐渐降低（表4）。在棉花现蕾期（施肥时），CRKS处理SPAD值显著高于CK1和CK2

处理，但与KCID和CRK处理差异不显著。各处理在初花期和盛花期SPAD值差异不显著，但铃期时CRKS处理显著高于CK2处理。在始絮期和成熟期，CRKS处理SPAD值显著高于CK1和CK2处理，CRK和KCID处理间差异不显著，但成熟期均显著

表4 2015年棉花生育期叶片SPAD变化

Table 4 Variation of SPAD during the cotton growing period in 2015 relative to treatment						
处理 Treatment	现蕾期 Squaring	初花期 Initial bloom	盛花期 Full bloom	铃期 Boll bearing	始絮期 Initial boll-opening	成熟期 Mature
CK1	40.73b	48.51a	47.57a	40.03b	39.67b	30.80c
CK2	40.50b	47.41a	48.40a	40.07b	37.57b	27.10c
KCIS	41.07b	48.58a	48.56a	43.90a	38.63b	29.43c
KCID	42.87ab	48.27a	48.78a	42.97a	41.13ab	33.20b
CRK	43.20a	48.05a	47.93a	44.60a	41.12ab	34.63ab
CRKS	44.97a	48.88a	48.69a	43.10a	42.07a	35.23a

高于CK2处理。

叶片净光合速率（P_n）随棉花生长逐渐升高，但在盛花期后随叶片衰老而逐渐降低（表5）。2015年施肥，各处理P_n以CRKS处理最高，KCID和CRK处理均显著高于CK2处理，但CRK和CRKS处理差异不显著。初花期时CK1处理显著高于CK2，其他钾肥处理间差异不显著。盛花期时CK1和CRKS处理P_n显著高于CK2和KCID处理，但铃期时CRK、CRKS和KCID处理P_n值差异不显著。在成熟期时，CRKS处理棉P_n值显著高于其他处理，KCID与CRK差异不显著，但显著高于CK1、CK2和KCIS处理。

2.4 不同施肥处理对棉花和大蒜生长、产量和品质的影响

CRKS较CK1和CK2显著提高了成铃数和单铃重，但2015年单铃重与CK1差异不显著（表6）。CRK成铃数显著高于CK2处理。2015年KCIS成铃数和单铃重均显著高于CK2处理。2014和2015年籽棉产量以CRKS最高，较其余处理显著增产7.1%~14.2%和8.0%~22.8%，但2013年与CRK和KCID处理差异不显著。KCID与CRK处理间籽棉产量差异不显著，但均显著高于CK2处理。CRK棉花衣分含量显著高于CK2。皮棉随籽棉产量的变化而变化，增产效应与籽棉一致，KCIS处

表5 2015年棉花生育期叶片净光合速率变化

Table 5 Variation of net photosynthetic rate of function leaf during the cotton growing period in 2015 relative to treatment ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)						
处理 Treatment	现蕾期 Squaring	初花期 Initial bloom	盛花期 Full bloom	铃期 Boll bearing	始絮期 Initial boll-opening	成熟期 Mature
CK1	23.83de	32.19a	36.07a	29.27a	20.96ab	15.25c
CK2	21.43e	29.98b	33.77b	28.24b	18.51b	12.05c
KCIS	23.50cd	31.46ab	35.57ab	29.31a	20.81ab	14.92c
KCID	24.87bc	30.60ab	33.97b	27.85a	21.81a	16.10b
CRK	25.20ab	30.38ab	35.03ab	29.03a	21.89a	16.53ab
CRKS	26.43a	31.56ab	36.81a	30.23a	22.67a	16.73a

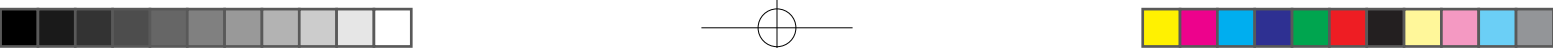


表6 各处理棉花产量和产量构成

Table 6 Yield and yield composition of cotton relative to treatment						
年份 Year	处理 Treatment	成铃数 Number of bolls (No.plant ⁻¹)	单铃重 Single boll weight (g)	籽棉 Seed yield (g plant ⁻¹)	衣分 Lint percentage (%)	皮棉 Lint yield (g plant ⁻¹)
2013	CK1	15.97bc	6.19bc	98.87bc	38.93a	38.49bc
	CK2	15.64c	6.04c	94.49c	38.13b	36.03c
	KClS	16.24b	6.16bc	100.02bc	39.70a	39.70b
	KClD	16.42b	6.25bc	102.63ab	39.08a	40.11ab
	CRK	16.44b	6.34ab	104.25a	39.09a	40.15ab
	CRKS	17.44a	6.46a	112.69a	39.93a	45.00a
2014	CK1	15.94c	6.04bc	96.35c	41.27ab	39.76bc
	CK2	15.34d	5.97c	91.60d	40.01b	36.65c
	KClS	15.91c	6.15b	97.86bc	41.08ab	40.20bc
	KClD	15.81cd	6.24a	98.76bc	42.69a	41.30b
	CRK	16.63b	6.22a	102.78b	41.41ab	42.56b
	CRKS	17.66a	6.24a	110.17a	43.54a	47.97a
2015	CK1	14.96c	6.08ab	87.83c	41.84ab	35.72c
	CK2	13.98d	5.87b	84.99c	40.67b	35.56c
	KClS	14.87b	6.14a	91.30b	41.39ab	37.79b
	KClD	15.18b	6.17a	93.63b	42.00ab	39.39b
	CRK	15.56b	6.21a	96.63b	42.30ab	40.88b
	CRKS	16.49a	6.33a	104.40a	42.57a	44.44a

注：同一列中同年平均值后标有相同小写字母表示差异不显著 ($p < 0.05$) Note: Means followed by the same lowercase letters in the same year are insignificant in difference in the same year ($p < 0.05$)

理皮棉产量显著高于CK2处理（2014年差异不显著），而CRKS处理显著高于CRK处理（2013年差异不显著），表明施用硫磺能够有效提高棉花产量。CRKS三年平均产量较CK1分别增加16.9%、20.6%和18.9%，较CK2分别增加24.8%、30.8%和22.8%，较KClS分别增加12.2%、16.1%和11.5%。

大蒜蒜薹和鳞茎产量均以CRKS最高，较其余处理分别增产2.8%~27.9%和4.8%~27.9%，但2014年CRKS与CK1蒜薹产量差异不显著（表7）。2014年CK1较CK2和KClD蒜薹分别显著增产22.1%和70.8%，但鳞茎产量较KClD和CRK分别降低22.1%和25.3%。2014年施用硫磺对蒜薹和鳞茎产量无显著影响，但2015年CRKS蒜薹和鳞茎分别显著增加17.1%和11.0%，说明连续施用控释氯化钾配施硫磺能够提高大蒜产量。

CRK和CRKS较CK2处理显著提高了纤维长

度，但CRKS与CK1差异不显著（表8）。2014年CK2与KClS、KClD处理整齐度指数差异不显著，但显著低于CK1和CRKS处理。各处理纤维马克隆值和伸长率未表现出显著差异，伸长率均为6.2%~6.9%。CK1和CRKS处理的纤维长度显著高于CK2处理，TKPC和CRK差异不显著，但2015年KClD和CRK处理均显著高于CK2处理。

3 讨 论

3.1 不同钾肥处理对土壤钾素供应和有效性的影响
各生育期合理的钾肥供应是棉花高产优质的重要保证。在大蒜-棉花套作模式下，棉花苗期与大蒜在田间共同生长，这一阶段依靠土壤基础肥力满足棉花自身钾素需求。虽然棉花蕾期前植株矮小，对钾的需求量相对较少^[7]，但此时缺钾会抑制棉

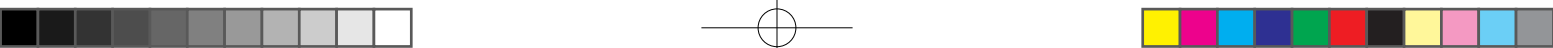


表7 不同处理蒜薹和鳞茎产量

Table 7 Yields of garlic bulbs and bolt relative to treatment				
处理 Treatment	2014		2015	
	蒜薹Bolt (g m ⁻²)	鳞茎Bulb (g m ⁻²)	蒜薹Bolt (g m ⁻²)	鳞茎Bulb (g m ⁻²)
CK1	349.7a	2 403c	254.0b	2 456c
CK2	286.4c	2 496bc	229.4b	2 566bc
KCIS	297.2abc	2 492bc	251.8b	2 583b
KCID	278.9cd	2 597b	239.0b	2 657b
CRK	305.8abc	2 729ab	250.3b	2 734b
CRKS	359.7a	2 861a	293.0a	3 035a

表8 2014年和2015年各处理棉花纤维品质

Table 8 Fiber quality of cotton relative to treatment in 2014 and 2015						
年份 Year	处理 Treatment	纤维长度 Length (mm)	整齐度指数 Uniformity (%)	马克隆值 Micronaire	伸长率Specific elongation (%)	断裂比强度 Strength (cN tex ⁻¹)
2014	CK1	30.67a	86.67a	5.33a	6.67a	28.25a
	CK2	29.08b	84.60c	5.31a	6.63a	26.59b
	KCIS	30.29ab	85.47abc	5.32a	6.20a	28.01a
	KCID	30.29ab	85.53abc	5.31a	6.53a	29.12ab
	CRK	30.57a	85.95ab	5.34a	6.57a	29.83ab
	CRKS	30.49a	86.37a	5.04a	6.67a	30.59a
2015	CK1	30.23a	85.27a	5.07a	6.83a	29.20ab
	CK2	28.87b	84.33b	5.37a	6.70a	28.63c
	KCIS	30.03a	84.97ab	5.33a	6.73a	28.77bc
	KCID	29.47b	85.00a	5.37a	6.80a	29.17b
	CRK	29.93ab	85.17a	5.21a	6.83a	29.27ab
	CRKS	30.27a	85.53a	5.00a	6.87a	29.63a

花根系的伸长生长、侧根的发生^[15]和叶片叶绿素合成^[16]。本研究表明,施用控释氯化钾提高了棉花现蕾期(施肥前)土壤速效钾含量(表2),从而满足了这一阶段棉花对钾素需求,这主要与上一季所用控释氯化钾养分缓慢释放有关。棉花在初花期至始絮期钾素积累速率达到峰值^[17]。本研究所用控释氯化钾从现蕾期至始絮期养分释放平稳,提高了棉花铃期和始絮期土壤速效钾含量,为棉花增产优质打下良好的基础。

土壤中的钾有多种形态,不同形态钾素对作物的有效性不同^[18]。本研究结果表明,控释氯化钾一次性基施能够提高棉花收获后土壤水溶性钾和非特殊吸附钾含量(表4),从而提高了土壤钾素有效性。这一方面与速效钾肥在土壤中容易转变为非

交换态钾或固定态钾^[5],而控释氯化钾钾素释放缓慢,可能减少了土壤钾素的固定有关,另一方面可能与控释钾肥减少了随雨水淋溶或地表径流导致的钾肥损失,提高了棉花后期土壤钾素供应,避免了棉株生长后期因缺钾而早衰有关。

3.2 不同钾肥处理对棉花产量和品质的影响

棉花是需钾素较多的作物,而且80%以上的钾在中后期吸收^[19]。增加棉花生长后期钾肥供应可显著提高叶片SPAD值(表4)和光合速率(表5),从而为棉花增产提供充足的物质供应^[8]。本研究表明,控释氯化钾配施硫磺提高了棉花盛花期之后土壤速效钾含量,从而提高了功能叶片SPAD值和净光合速率,改善了棉花长势。研究表明,棉花后期追施钾肥显著提高了棉花后期土壤速

效钾含量,从而延缓叶片衰老^[20],这与本研究结果相一致。本研究表明,控释氯化钾配施硫磺处理皮棉产量较硫酸钾和氯化钾一次性基施分别显著增产16.9%~24.9%和24.4%~30.9%,较氯化钾分次追施处理增产12.2%~16.1%。虽然控释氯化钾一次基施与氯化钾分次追施处理产量基本一致,但控释氯化钾一次施用就能够满足棉花各生育期对钾素的需求,简化了施肥步骤,减少了人力投入。

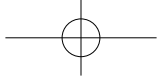
纤维品质是评价棉花商品性能最重要的指标。本试验表明,控释钾肥较普通钾肥基施处理显著改善了棉花品质,提高了纤维长度和伸长率(表7),体现了控释钾肥配施硫磺在改善纤维品质方面的优越性。一方面控释氯化钾提高了盛花期和始絮期土壤速效钾含量(表2),满足了棉花钾素的需求。另一方面硫磺作为重要的硫源,在土壤中逐渐被氧化从而转变成植物可吸收的硫酸盐^[21],同时改善了土壤中有效铁等微量元素活性^[22],进而提高了棉花叶片光合速率和干物质积累速率^[23],改善了纤维品质。因此,用控释氯化钾配施硫磺一次基施代替硫酸钾和氯化钾可获得与单施控释氯化钾相同或更高的产量,但关于硫磺对棉花生长的作用机制和控释钾肥与硫肥的交互效应还有待于进一步研究。本研究结果不仅对节约钾肥资源,增加植棉效益具有至关重要的意义,同时也为硫磺包膜控释氯化钾肥料的研发提供了一定的数据支持。

4 结 论

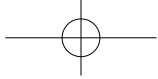
控释钾肥持续提供钾素,且释放高峰期与棉花养分吸收高峰期相吻合,显著提高了铃期和始絮期土壤速效钾含量,并提高了棉花始絮期和收获期功能叶片SPAD值和净光合速率。经过3年5季施肥后,控释氯化钾配施硫磺较普通钾肥一次基施显著提高土壤水溶性钾和非特殊吸附钾含量,从而提高了土壤钾素有效性。控释钾肥提高了蒜棉套作体系产量,与硫酸钾和氯化钾一次基施处理相比,控释氯化钾配施硫磺皮棉分别增产12.2%~16.1%和8.7%~10.4%,同时提高了纤维长度和整齐度指数。棉花增产主要原因是提高了成铃数和单铃重。因此,用控释氯化钾配施硫磺替代硫酸钾和氯化钾,可满足棉花整个生育期对钾素的需求,提高了棉花产量和纤维品质,应在棉花生产中推广应用。

参 考 文 献

- [1] 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.农学学报,2013,3(2):6—11
Fu X Q, Yuan B Z, Liu Y, et al. Effects of rate and ways of potassium application on biomass and yield and fiber quality of cotton (In Chinese). Journal of Agriculture, 2013, 3(2): 6—11
- [2] 李宗泰,陈二影,张美玲,等.施钾方式对棉花叶片抗氧化酶活性、产量及钾肥利用效率的影响.作物学报,2012,28(3):487—494
Li Z T, Chen E Y, Zhang M L, et al. Effect of potassium application methods on antioxidant enzyme activities, yield, and potassium use efficiency of cotton (In Chinese). Acta Agronomica Sinica, 2012, 28(3): 487—494
- [3] Read J J, Reddy K R, Jenkins J N. Yield and fiber quality of upland cotton as influenced by nitrogen and potassium nutrition. European Journal of Agronomy, 2006, 24(3): 282—290
- [4] Geng J B, Ma Q, Zhang M, et al. Synchronized relationships between nitrogen release of controlled release fertilizers and nitrogen requirements of cotton. Field Crops Research, 2015, 184: 9—16
- [5] Wang H Y, Zhou J M, Du C W, et al. Potassium fractions in soils as affected by monocalcium phosphate, ammonium sulfate, and potassium chloride application. Pedosphere, 2010, 20(3): 368—377
- [6] Zhao J Q, Zhao F, Jian G, et al. Intensified Alternaria spot disease under potassium deficiency conditions results in acceleration of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) leaf senescence. Australian Journal of Crop Science, 2013, 7(2): 241—248
- [7] 李伶俐,马宗斌,张东林,等.盛铃期补施钾肥对不同群体棉花光合特性和产量品质的影响.植物营养与肥料学报,2006,127(5):662—666
Li L L, Ma Z B, Zhang D L, et al. Effects of applying potassium fertilizer at peak bolling stage on cotton photosynthetic characteristics and its yield and quality under different population (In Chinese). Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2006, 12(5): 662—666
- [8] 耿计彪,马强,张民,等.控释钾肥一次基施对棉花生长周期钾素供应、产量及品质的影响.植物营养与肥料学报,2016(4):1064—1070
Geng J B, Ma q, Zhang M, et al. Effects of controlled release potassium fertilizer application on yield,



- fiber quality and soil available potassium of cotton (In Chinese). Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016 (4): 1064—1070
- [9] 田晓飞, 李成亮, 张民, 等. 控释氮肥对洋葱-棉花套作体系产量和土壤氮含量的影响. 农业环境科学学报, 2015, 34 (4): 745—752
- Tian X F, Li C L, Zhang M, et al. Effects of controlled-release nitrogen fertilizer on yields and soil nitrogen in onion-cotton intercropping system (In Chinese). Journal of Agro-Environment Science, 2015, 34 (4): 745—752
- [10] Hu W, Zhao W Q, Yang J S, et al. Relationship between potassium fertilization and nitrogen metabolism in the leaf subtending the cotton (*Gossypium hirsutum* L.) boll during the boll development stage. Plant Physiology and Biochemistry, 2016, 101: 113—123
- [11] Hu W, Yang J S, Meng Y L, et al. Potassium application affects carbohydrate metabolism in the leaf subtending the cotton (*Gossypium hirsutum* L.) boll and its relationship with boll biomass. Field Crops Research, 2015, 179: 120—131
- [12] 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. 土壤学报, 2014, 51 (2): 295—305
- Li C L, Huang B, Sun Q S, et al. Effects of application rates of controlled release fertilizers on cotton growth and soil fertility (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2014, 51 (2): 295—305
- [13] 中华人民共和国工业和信息化部. 缓释肥料. HG/T4215—2011, 2012
- Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Slow release fertilizer (In Chinese). HG/T4215—2011, 2012
- [14] Gao X, Li C L, Zhang M, et al. Controlled release urea improved the nitrogen use efficiency, yield and quality of potato (*Solanum tuberosum* L.) on silt loamy soil. Field Crops Research, 2015, 181: 60—68
- [15] 张志勇, 王清连, 李召虎, 等. 缺钾对棉花幼苗根系生长的影响及其生理机制. 作物学报, 2009, 35 (4): 718—723
- Zhang Z Y, Wang L Q, Li Z H, et al. Effect of potassium deficiency on root growth of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) seedlings and its physiological mechanisms involved (In Chinese). Acta Agronomica Sinica, 2009, 35 (4): 718—723
- [16] 郭英, 孙学振, 宋宪亮, 等. 钾营养对棉花苗期生长和叶片生理特性的影响. 植物营养与肥料学报, 2006, 12 (3): 363—368
- Guo Y, Sun X Z, Song X L, et al. Effects of potassium nutrition on growth and leaf physiological characteristics at seedling stage of cotton (In Chinese). Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2006, 12 (3): 363—368
- [17] Yang G Z, Tang H Y, Tong J, et al. Effect of fertilization frequency on cotton yield and biomass accumulation. Field Crops Research, 2012, 125: 161—166
- [18] 王西和, 吕金岭, 刘骅. 灰漠土小麦-玉米-棉花轮作体系钾平衡与钾肥利用率. 土壤学报, 2016, 53 (1): 213—223
- Wang X H, Lü J L, Liu H. Potassium balance and use efficiency in grey desert soil under continuous wheat-maize-cotton crop rotation system (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2016, 53 (1): 213—223
- [19] 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. 植物营养与肥料学报, 2012, 18 (1): 123—131
- Li Z T, Chen E Y, Song X L, et al. Effects of rate and time of potassium application on yield and fiber quality of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) at different fruit positions (In Chinese). Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2012, 18 (1): 123—131
- [20] Oosterhuis D, Loka D, Kawakami E, et al. The physiology of potassium in crop production. Advances in Agronomy, 2014, 126, 203—234
- [21] Blair G, Lefroy R. Sulfur and carbon research in rice production systems. Field Crops Research, 1998, 56: 177—181
- [22] Wang Y P, Li Q B, Wang H, et al. Effect of sulphur on soil Cu /Zn availability and microbial community composition. Journal of Hazardous Materials, 2008, 159: 385—389
- [23] Geng J B, Ma Q, Chen J Q, et al. Effects of polymer coated urea and sulfur fertilization on yield, nitrogen use efficiency and leaf senescence of cotton. Field Crops Research, 2016, 187: 87—95

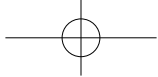


Effects of Controlled Release Potassium Fertilizer on Crop Yields and Soil Potassium Supply under Cotton-garlic Intercropping System

TIAN Xiaofei LI Chengliang[†] ZHANG Min[†] GUO Yanle ZHANG Weitao

(National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources/National Engineering and Technology Research Center for Slow and Controlled Release Fertilizers, College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China)

Abstract 【Objective】 Potassium is one of the essential mineral elements for normal growth of cotton and garlic. However, so far little has been reported on effect of controlled release potassium fertilizer on crops growth and soil potassium supply. The present study investigated effects of controlled release potassium chloride with or without the addition of sulfur as the alternates of potassium sulfate and potassium chloride on yield of cotton and soil available potassium content, in an attempt to provide a certain theoretic basis for rationalization of the use of potassium fertilizer. 【Method】 A three-year plot experiment was consecutively conducted in 2013, 2014 and 2015 under a cotton-garlic intercropping system in Northeast China. The experiment was designed to have six treatments: 1) basal application of potassium chloride (CK1); 2) basal application of potassium sulfate (CK2); 3) 50% of potassium chloride basal and 50% top-dressing at the full bloom stage (KCID); 4) basal application of potassium chloride with sulfur (KCIS); 5) basal application of controlled release potassium chloride (CRK); and 6) basal application of controlled release potassium chloride with sulfur (CRKS), and three replicates for each treatment, and laid out randomly in plots separated from each other and isolated with cement boards. The K release of CRK in 25 °C water and soil conditions was measured using the weight loss method in line with the “National Standard of the People’s Republic of China for Slow Release Fertilizer”. Samples of the soils and plants were collected for analysis of soil available potassium content, leaf SPAD value as well as net photosynthetic rate during cotton growth. Meanwhile, quality and yield of cotton were investigated, too. 【Result】 Results show that the controlled release potassium chloride corresponded released K well in coincidence with the demand of cotton for potassium during its growth period. The contents of soil available potassium, leaf SPAD and net photosynthetic rate all increased in both Treatments CRK and CRKS after the full bloom stage especially at the initial boll-opening stage and harvest stage, as compared with the treatments of basal application of conventional potassium fertilizers (CK1 and CK2). The number of bolls per plant and weight per boll in Treatment CRKS increased significantly and hence the yield of lint did by 16.9% ~ 30.9% over that of CKs, by 12.2% ~ 16.1% over that of Treatment KCID and by 8.7% ~ 10.4% over that of CRK. Treatment CRKS was also the highest in yireld of garlic bulbs and bolts, or 2.8% ~ 27.9% and 4.8% ~ 23.5%, respectively, higher than Treatment KCID and CRK. Treatment CRKS also significantly improved quality of the cotton, too, such as length, uniformity and specific elongation of lint fibre. After the three-year fertilization, the contents of soil water-soluble K and exchangeable K increased while the content of non-exchangeable K decreased in Treatment CRKS as compared with Treatments CK1 and CK2. 【Conclusion】 All the findings suggest that



controlled release potassium chloride amended with sulfur is recommended to replace potassium sulfate and potassium chloride to achieve higher crop yields, higher soil K use efficiency, while improving crop quality under the cotton-garlic intercropping system.

Key words Controlled release potassium chloride; Cotton; Photosynthetic characteristics; Quality; Soil available K

（责任编辑：卢 萍）