

控释含缩节胺氯化钾对棉花叶片生理及土壤钾素形态的影响

于起庆, 耿计彪*, 杨玉坤, 王 嘉, 于文勇, 赵 薇, 刘前进, 杨修一*

(山东省水土保持与环境保育重点实验室, 临沂大学资源环境学院 / 农林科学学院, 山东 临沂 276000)

摘 要: 钾素是棉花必需的元素, 缩节胺是控制棉株旺盛生长的重要调节剂, 为减少钾素和缩节胺施用次数, 实现两者在同一时空条件下的一体化调控, 研究一次性施用控释含缩节胺氯化钾 (CRKMC) 对棉花叶片生理及土壤钾素形态的影响。试验设置空白对照、氯化钾、控释氯化钾、控释含缩节胺氯化钾、减量 20% 的控释含缩节胺氯化钾处理。结果表明: CRKMC 较 KCl 处理显著提高盛花期叶绿素 b 和可溶性蛋白含量, 增强过氧化物酶和超氧化物歧化酶活性, 减少丙二醛产生量, 但不同类型钾肥对叶绿素 a 无显著影响; 棉花生育期内, 土壤水溶性钾呈下降趋势, 速效钾和交换性钾呈动态波动变化, 自盛花期以后, CRKMC 处理各形态钾素较 KCl 显著增加; 等量施钾条件下, CRKMC 较 KCl 处理皮棉增加 13.31%, 钾素农学利用率提高 $2.19 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 减少 20% 钾素用量的 CRKMC 皮棉仍较 KCl 增加 9.20%。因此, 在棉花上一次基施 CRKMC 可改善叶片生理特征, 延缓叶片衰老, 合理调节不同形态钾素供应, 利于实现棉花轻简化和高产化栽培。

关键词: 控释含缩节胺氯化钾; 棉花; 产量; 叶片生理; 钾素形态

棉花为无限生长特性的经济作物, 化学调控是其高产栽培关键配套措施之一^[1]。缩节胺是一种高效、低毒、无药害的植物生长延缓剂, 通过抑制植株体赤霉素的合成, 达到塑造理想株型, 协调棉株营养生长与生殖生长关系, 激发品种增产潜能的目的^[2-3], 在世界植棉国中广泛应用。由于缩节胺降解快, 有效期一般为 15 ~ 20 d, 棉花生长期内需叶面喷施 2 ~ 5 次^[4]。研究表明在蕾期、初花期、盛花期和铃期喷施 4 次缩节胺, 可控制株高, 增加产量^[5]; 高剂量喷施则会降低叶片丙二醛产生量及过氧化物酶活性, 增加叶绿素和可溶性蛋白含量^[6]。但是多次喷施会增加人工投入, 使植棉经济效益下降, 且易因施用剂量和时期把握不当造成减产。随现阶段农村劳动力转移和农业生产用工成本不断提高, 繁琐的植棉管理用工, 已成为棉花生产持续发展的障碍^[7-8]。

棉花属典型喜钾作物, 土壤钾对棉花的有效性

取决于其存在形态和分布状况^[9]。钾素的生物有效性除了土壤本身的钾素转化作用外, 外源性钾也会影响土壤钾素的释放和固定, 改变钾素形态间相互转化的动态平衡。作物轮作期内不施钾肥, 速效钾被吸收后, 非交换性钾会被释放^[10]; 施钾能提高土壤水溶性钾和交换性钾含量, 并向非交换性钾方向转化^[11]。但是传统的氯化钾和硫酸钾施入土壤后易被固定或转化为有效性较低的非交换态钾和固定态钾^[12], 且易随雨水淋溶或地表径流损失, 与棉花的钾素需求不匹配, 导致棉花后期因缺钾而早衰^[13]。控释氯化钾可缓慢释放钾素, 一次性施用后改善棉花叶绿素荧光特性, 提高土壤速效钾含量^[14], 成为新型钾肥的研究热点。

前人研究多集中在不同时期、剂量喷施缩节胺或不同类型钾肥施用方式分别对棉花产量的影响, 但对二者的一体化调控研究较少。因此, 本试验利用控释肥料根据作物需求精准释放养分的特点, 在氯化钾颗粒形成过程中, 添加适量的缩节胺, 然后进行包膜, 研究一次性施用控释含缩节胺氯化钾对棉花叶片生理特征及土壤钾素形态的影响。以期延长缩节胺和钾素的有效期, 满足棉花生长调控需求, 为实现钾素供应与化学调节的一体化提供技术支撑, 为棉花轻简化和高产化栽培提供理论依据。

收稿日期: 2019-09-20; 录用日期: 2019-10-13

基金项目: 国家自然科学基金 (42007091); 山东省自然科学基金 (ZR2018PD001); 中国博士后科学基金 (2017M622120); 山东省属高校优秀青年基金 (ZR2017JL019)。

作者简介: 于起庆 (1997-), 男, 安徽人, 本科, 主要从事土壤养分循环工作。E-mail: 531891294@qq.com。

通讯作者: 耿计彪, E-mail: gengjibiao@126.com; 杨修一, E-mail: woshiyangxiuyi@163.com。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2018年4月至11月在山东省沂南县牛家小河村试验基地(N 35° 7' 4", E 118° 16' 50")进行,该地属温带季风气候,雨热同季,全年平均气温14.1℃。0~20 cm土壤质地为砂质壤土,其中粉粒、砂粒和黏粒含量分别为23.94%、55.67%和20.39%。试验前土壤的基本理化性质为:速效钾、水溶性钾和交换性钾含量分别是167.72、90.85和76.87 mg·kg⁻¹,pH值为6.35,有机质和全氮含量为6.4和0.87 g·kg⁻¹,硝态氮,铵态氮,有效磷分别为54.56、22.59和36.02 mg·kg⁻¹。

试验所用棉花品种为“鲁棉研28号”,供试肥料包括树脂包膜控释含缩节胺氯化钾(在氯化钾造粒过程中添加缩节胺,然后对含缩节胺的氯化钾颗粒包膜,具体制作方法参照“一种含缩节胺的棉花专用控释尿素及其制备方法”^[15],其中含缩节胺0.8%,K₂O 53.18%,25℃静水释放期为120 d),控释氯化钾(25℃静水释放期为4个月,含K₂O 54.43%),普通氯化钾颗粒(含K₂O 57%),树脂

包膜尿素(25℃静水释放期4个月,含N 44.1%),磷酸二铵(含P₂O₅ 46%,含N 18%)。

1.2 试验设计

试验采用单因素随机区组设计,共5个处理,每个处理3次重复,小区规格5 m宽、6 m长,施肥处理N-P₂O₅-K₂O施用量为180-150-180 kg·hm⁻²,各处理代号和肥料施用量如表1所示,分别为施用180 kg·hm⁻²(按K₂O计)控释含缩节胺氯化钾(CRKMC1);减量20%钾素施用量的控释含缩节胺氯化钾(CRKMC2);施用180 kg·hm⁻²的普通控释氯化钾(CRK);施180 kg·hm⁻²的氯化钾处理(KCl);不施钾肥(CK)。各处理所施氮磷量相同,由控释尿素和磷酸二铵提供氮和磷养分,均在播种前作为底肥一次性施入。控释含缩节胺氯化钾和控释氯化钾作为基肥一次性施入,普通氯化钾基施60%,初花期追施40%。控释含缩节胺氯化钾处理不再额外叶面喷施缩节胺,其他3个处理喷施3次,按照当地农民习惯施用量和时间,分别在蕾期(45 g·hm⁻²)、初花期(90 g·hm⁻²)和盛铃期(120 g·hm⁻²)喷入,各处理均不打顶。采用双垄地膜覆盖进行种植,平均密度为48 000株·hm⁻²。

表1 各试验处理小区的施肥量及缩节胺喷施次数

处理	控释尿素	磷酸二铵	氯化钾	控释氯化钾	控释含缩节胺氯化钾	缩节胺
	(kg)					
CRKMC1	0.85	0.98	—	—	1	不喷
CRKMC2	0.85	0.98	—	—	0.8	
CRK	0.85	0.98	—	0.99	—	喷施 3 次
KCl	0.85	0.98	0.94	—	—	
CK	0.85	0.98	—	—	—	

注:表中“—”表示不施用该肥料。

1.3 样品采集与测定

棉花在4月20日播种,苗期(播种后23 d),盛花期(播种后78 d),始絮期(播种后132 d),收获结束(播种后196 d)时,分别进行土壤样品的采集和测定。按照“对角线五点取样”方法,使用土钻采集耕层土壤,混匀后带回实验室进行风干,并磨碎过1.68 mm筛。土壤速效钾用1 mol·L⁻¹中性醋酸铵(水土比为20:1)提取;水溶性钾按水土比10:1用蒸馏水提取;各提取液采用火焰光度法测定钾素含量,然后根据速效钾与水溶性钾含量的差值计算交换性钾^[16]。

于盛花期取各小区内棉株完全展开的倒四叶

叶片,用夹链袋装好并放在冷冻保鲜盒内,带回实验室进行生理特性的分析。其中超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑光化还原法测定;过氧化物酶(POD)采用愈创木酚法测定;丙二醛(MDA)采用硫代巴比妥酸法,在532、600和450 nm波长下比色测定^[17]。使用80%丙酮浸提叶片,722型可见光分光光度计比色,测定663、645和652 nm波长处的吸光值,计算叶绿素a和叶绿素b的值^[18]。

棉株收获时,根据叶片、茎秆和生殖器官(蕾、棉壳、棉籽和棉絮均视为生殖器官部分)分别取样,然后带回实验室,于105℃烘箱内杀青0.5

h, 然后 60℃ 烘干至恒重, 将烘干的样品磨碎后过 0.25 mm 筛, 采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{—H}_2\text{O}_2$ 消煮, 火焰光度法测定全钾含量, 根据各部分生物量与钾素含量的乘积, 计算植株的钾素吸收总量。小区内的全部棉花按照吐絮情况采收 6 次, 进行产量统计, 取 500 g 籽棉经手持式轧花机轧取纤维, 由纤维与籽棉的重量比值计算衣分含量。

1.4 数据处理

根据钾素农学利用率 ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$) = (施钾区籽棉产量 - 对照区籽棉产量) / 施钾量; 钾素偏生产力 = 施钾区籽棉产量 / 施钾量计算^[19]。

数据采用 Excel 2012、Sigmaplot 12.5 处理和制图, 用 SAS 8.0 统计软件对数据进行差异显著性分析 ($P < 0.05$) 及 ANOVA 方差分析。

2 结果与分析

2.1 控释含缩节胺氯化钾对棉花产量及钾素吸收量的影响

不同类型钾肥施用显著影响棉花籽棉产量和衣分 (表 2), CRKMC1、CRKMC2 和 CRK 籽棉产量无差异, 但 CRKMC1 和 CRK 显著高于 KCl; 施钾处理衣分保持在 42.32% ~ 44.06%, CRKMC1 较 KCl 增加 1.74 个百分点; CK 皮棉产量最低, 仅为 1 391.24 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, CRKMC1、CRKMC2 和 CRK 处理较 KCl 分别增加 13.31%、9.20% 和 11.59%。

表 2 不同施钾处理棉花的产量

处理	籽棉 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	衣分 (%)	皮棉 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	皮棉较 KCl 增产率 (%)
CRKMC1	3 928.9a	44.06a	1 730.46a	13.31
CRKMC2	3 897.4ab	42.79b	1 667.70a	9.20
CRK	3 946.7a	43.18ab	1 704.12a	11.59
KCl	3 608.9b	42.32bc	1 527.17b	—
CK	3 351.1c	41.52c	1 391.24c	-8.91

注: 同列数值后不同小写字母表示处理间呈显著性差异 ($P < 0.05$), 下同。

CRKMC1 和 KCl 处理叶片的钾素累积量高于 CK (表 3), 分别为 90.21 和 86.76 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 但各施钾处理间差异不显著; CRKMC1 茎秆钾素累积量高于 KCl (114.41 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 和 CK (94.99 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), CRKMC2、CRK 和 KCl 处理间未表现出差异; 各施钾处理的生殖器官钾素累积量

无显著差异, 保持在 156.86 ~ 169.69 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 但高于 CK。

表 3 不同处理棉株叶片、茎和生殖器官的钾素累积量

处理	叶钾素累积量	茎钾素累积量	生殖器官钾素累积量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
CRKMC1	90.21a	153.77a	162.23a
CRKMC2	84.40ab	134.69ab	169.69a
CRK	83.79ab	139.81ab	156.86a
KCl	86.76a	114.41bc	159.94a
CK	70.19b	94.99c	122.30b

不同类型钾肥显著影响了棉花钾素农学利用率 (图 1) 和偏生产力 (图 2), CRKMC2、CRKMC1 和 CRK 的农学利用率保持在 3.21 ~ 3.81 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 分别较 KCl 增加 2.19、1.59 和 1.69 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$; CRKMC2 偏生产力最高, 达到 26.61 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 较 KCl 增加 31.48%, 其余 3 个施钾处理间差异不显著。

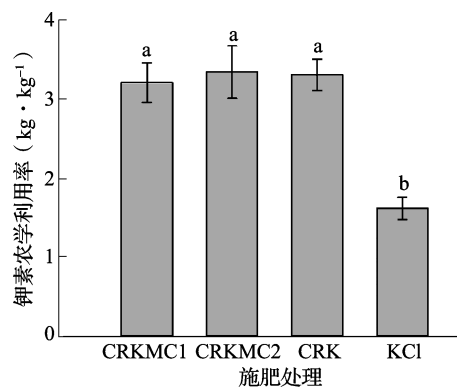


图 1 不同处理棉花的钾素农学利用率

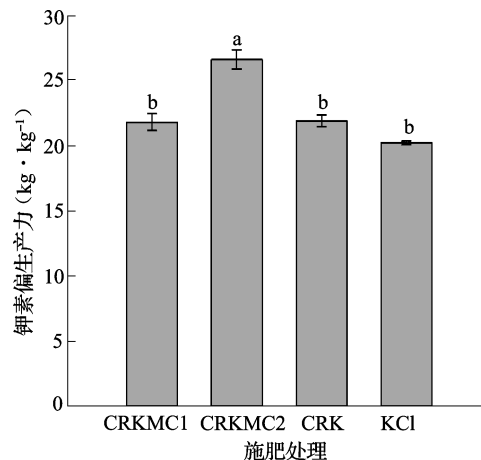


图 2 不同处理棉花的钾素偏生产力

2.2 控释含缩节胺氯化钾对棉花叶片生理特征的影响

CK 处理的棉花叶片叶绿素 a 和 b 含量处于最低值 (表 4), 不同类型钾肥叶绿素 a 含量在 1.13 ~ 1.22 mg · g⁻¹, 除 CRKMC2 显著高于 CK, 其他处理与 CK 无显著差异; CRKMC1 的叶绿素 b 含量为 1.08 mg · g⁻¹, 高于 KCl 和 CK, 分别增加 42.11% 和 74.19%, 但与

表 4 不同施钾处理下棉花叶片的叶绿素含量 (mg · g⁻¹)

处理	叶绿素 a	叶绿素 b	叶绿素 a+b
CRKMC1	1.13ab	1.08a	2.21a
CRKMC2	1.22a	0.88ab	2.10a
CRK	1.19ab	0.89ab	2.08a
KCl	1.18ab	0.76bc	1.94a
CK	0.91b	0.62c	1.53b

CRKMC2 和 CRK 间差异不显著, 且 CRKMC2、CRK 和 KCl 间未表现出显著差异; 施钾显著提高了叶绿素 a+b 的含量, 保持在 1.94 ~ 2.21 mg · g⁻¹。

随控释含缩节胺氯化钾施用量减少, 叶片可溶性蛋白、SOD 和 POD 活性下降 (表 5), 但两处理间差异不显著; 施用钾肥可显著提高可溶性蛋白含量, 其中 CRKMC1 高于 CRK 和 KCl, CRKMC2、CRK 和 KCl 间无显著差异; 3 个控释钾肥处理的 SOD 和 POD 活性无显著差异, CRKMC1 的 SOD 活性最高, 达到 206.72 U · g⁻¹ · min⁻¹; 不同类型钾肥对 POD 活性影响不显著, CRK 的 POD 活性高于 CK; KCl 和 CK 的 MDA 含量最高, 分别为 44.75 和 45.63 μmol · g⁻¹, 较 CRKMC2 提高 23.82% 和 26.26%, CRKMC1、CRK 和 KCl 间未表现出显著差异。

表 5 不同施钾处理下棉花叶片的可溶性蛋白及抗氧化酶活性

处理	可溶性蛋白 (mg · g ⁻¹)	SOD (U · g ⁻¹ · min ⁻¹ , FW)	POD (U · g ⁻¹ · min ⁻¹ , FW)	MDA (μmol · g ⁻¹ , FW)
CRKMC1	38.26a	206.72a	1 024.64ab	39.32ab
CRKMC2	36.08ab	178.66ab	964.58ab	36.14b
CRK	32.00bc	181.26ab	1 042.20a	40.57ab
KCl	32.74bc	162.28b	814.05ab	44.75a
CK	28.30c	104.17c	785.99b	45.63a

2.3 控释含缩节胺氯化钾对棉田土壤不同形态钾素变化特征的影响

CK 处理土壤速效钾含量随生育期呈逐渐下降的趋势, 且各时期含量均显著低于其他处理 (图 3), 施钾处理自苗期至始絮期逐渐下降, 收获期时呈上升趋势。苗期时, CRKMC1 和 CRK 高于 CRKMC2, 由于氯化钾溶解快, 使 KCl 处理速效钾含量最高, 达到 256.68 mg · kg⁻¹; 盛花期时, CRKMC1 和 CRK 含量最高, 分别为 220.64 和 220.93 mg · kg⁻¹, KCl 处理含量迅速下降, 与 CRKMC2 差异不显著; 盛花期时, 3 个控释钾肥处理间差异不显著, 但高于 KCl 和 CK; 收获结束时, CRK、CRKMC1 和 CRKMC2 无显著差异, 但均高于 KCl 和 CK。

整体而言, 各处理土壤水溶性钾呈逐渐下降趋势 (图 4), 不同类型钾肥施用显著增加了水溶性

钾含量。苗期时, KCl 处理水溶性钾含量最高, 高于 CRKMC2 和 CK, CRKMC1、CRK 和 CRKMC2 间差异不显著; 盛花期时, KCl 水溶性钾含量迅速下降, 低于 CRKMC1 和 CRK, CRKMC2 与 KCl 无明显差异; 始絮期时, CRKMC1、CRKMC2 和 CRK 高于 KCl; 收获期时, 各施钾处理保持在 52.93 ~ 60.98 mg · kg⁻¹。

各处理土壤交换性钾含量大致呈盛花期上升, 始絮期下降, 然后再上升的趋势 (图 5), 且 CK 处于最低水平。苗期时表现为: KCl>CRK>CRKMC1>CRKMC2>CK; 盛花期时, CRKMC1 含量高于其他施钾处理, 达到 130.34 mg · kg⁻¹, CRK 与 CRKMC2 未表现出显著差异; 始絮期时, 各处理交换性钾保持在 91.63 ~ 98.30 mg · kg⁻¹; 收获期时, 3 个控释钾肥处理高于 KCl。

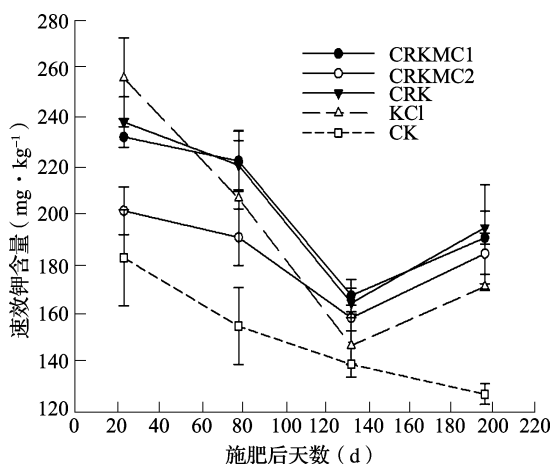


图3 不同处理土壤速效钾含量变化特征

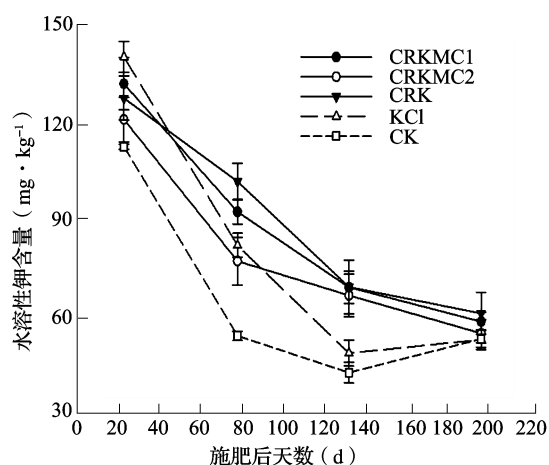


图4 不同处理土壤水溶性钾含量变化特征

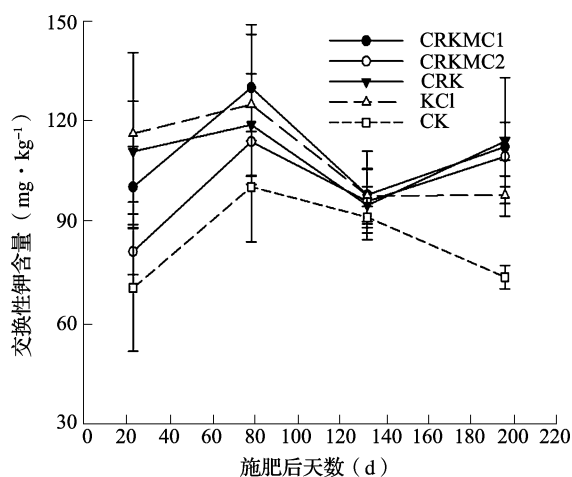


图5 不同处理土壤交换性钾含量变化特征

3 讨论

缩节胺可通过棉株叶片或根部吸收,传导至全株,抑制细胞伸长和植株纵向生长^[20],但是缩节胺在土壤中降解较快,且棉株根部施用的工序较

为复杂,多采用叶面喷施的形式塑造理想株型^[21]。喷施缩节胺可提高棉花叶片干物质分配率,降低茎秆分配率,促进干物质向生殖器官的运转^[22]。本试验中,与叶面喷施缩节胺相比,控释含缩节胺氯化钾提高了叶片叶绿素 a+b 含量,而叶绿素是光合作用的主要色素,会增强棉株的光合作用,促进有机物质的积累,为棉花高产打下物质基础,使钾素吸收量提高,并最终增加 7.32% ~ 13.31% 的皮棉产量,这与 Yang 等^[23] 研究结果一致。CRKMC 提高可溶性蛋白含量,增强过氧化物酶和超氧化物歧化酶活性,显著改善了叶片组织的活性氧代谢;而丙二醛产生量的下降,说明棉花细胞脂质过氧化作用受到抑制,减小了细胞膜因此引起的盐伤害,利于提高抗旱和抗逆能力,延缓了叶片衰老^[17, 24]。因此,通过包膜控释技术,用一次性土壤施用缩节胺代替 3 次叶面喷施,减少了劳动投入,提高了劳动效率,在技术上可行,也具经济实用性,这与田晓莉等^[4] 用棉籽包衣淀粉基缓释缩节胺,代替苗期至花铃期数次叶面喷施缩节胺的技术原理相似。本试验通过包膜控释技术有效延长了缩节胺的作用期,可实现棉花轻简化栽培,但是缩节胺释放后在土壤中的有效时长及有效量本文没有涉及,关于控释含缩节胺氯化钾在土壤中的释放规律及机制,需在以后的研究中进一步探索。

土壤钾素的容量较大,根据其有效性分为速效钾、非交换性钾和相对无效的矿物钾,而速效钾的含量决定当季土壤供钾水平^[25]。棉花钾素需求量大,长期进行棉花连作会加重土壤钾的耗竭^[9]。合理补施钾肥,可提高土壤速效钾含量,促进叶片光合效率,延缓叶片衰老^[11, 26]。本试验中,不同类型钾肥施用均增加了耕层土壤速效钾含量,控释含缩节胺氯化钾减少了苗期土壤的速效钾、水溶性钾和交换性钾含量,增加了盛花期以后土壤中的各形态钾素,这与田晓飞等^[27] 研究结果一致。由于普通氯化钾施入土壤后迅速水解,使苗期土壤各种形态钾素急剧增加,而此时棉株较小,钾素吸收量也少,富余钾素存在淋溶或转化风险;试验所用土壤为砂质壤土,养分极易随水流失^[28],导致盛花期以后土壤速效钾含量迅速降低。控释含缩节胺氯化钾,养分释放缓慢,避免了钾素离子急剧增加,使更多钾素被土壤胶体吸附,满足了棉株钾素吸收高峰期(盛花期至始絮期)的钾素需求,显著提高了钾素农学利用效率。在同等施钾量条件下,土壤速

效钾含量的增加,表明钾素向非交换性钾转化量减少^[29],提高棉花可吸收利用的水溶性钾和交换性钾含量。因此,在我国钾肥资源匮乏,钾素利用低的背景下,控释含缩节胺氯化钾是提高棉花钾素利用效率和产量的重要技术手段。

4 结论

棉花基施控释含缩节胺氯化钾较普通氯化钾处理,显著增加了皮棉产量,提高棉花钾素利用率。且一次性基施控释含缩节胺氯化钾,即使减少20%用量,棉花皮棉产量、叶绿素总量、可溶性蛋白、速效钾、水溶性钾和交换性钾较KCl显著增加。因此,一次性施用控释含缩节胺氯化钾,可改善棉花叶片生理特征,合理调节不同形态土壤钾素供应,减少了钾素追施和缩节胺喷施的用工,利于实现棉花轻简化和高产化栽培,可在棉花生产中推广应用。

参考文献:

- [1] 杨成勋,张旺锋,徐守振,等. 喷施化学打顶剂对棉花冠层结构及群体光合生产的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(9): 1672-1684.
- [2] Tung S A, Huang Y, Hafeez A, et al. Mepiquat chloride effects on cotton yield and biomass accumulation under late sowing and high density [J]. Field Crops Research, 2018, 215: 59-65.
- [3] 杨长琴,张国伟,刘瑞显,等. 种植密度和缩节胺调控对麦后直播棉产量和冠层特征的影响[J]. 棉花学报, 2016, 28(4): 331-338.
- [4] 田晓莉,谢湘毅,周春江,等. 棉籽包衣淀粉基缓释缩节胺的释放特性[J]. 中国农业科学, 2008, 41(10): 3042-3051.
- [5] 黎芳,王希,王香茹,等. 黄河流域北部棉区棉花缩节胺化学封顶技术[J]. 中国农业科学, 2016, 49(13): 2497-2510.
- [6] 周运刚,王俊刚,马天文,等. 不同DPC(缩节胺)处理对棉花生理生化特性的影响[J]. 新疆农业科学, 2010, 47(6): 1142-1146.
- [7] 张冬梅,张艳军,李存东,等. 论棉花轻简化栽培[J]. 棉花学报, 2019, 31(2): 163-168.
- [8] 丁武汉,谢海宽,徐驰,等. 一次性施肥技术对水稻-油菜轮作系统氮素淋失特征及经济效益的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1097-1109.
- [9] 韩春丽,刘梅,张旺锋,等. 连作棉田土壤剖面钾含量变化特征及对不同耕作方式的响应[J]. 中国农业科学, 2010, 43(14): 2913-2922.
- [10] Tan D S, Jin J Y, Jiang L H, et al. Potassium assessment of grain producing soils in North China [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2012, 148(4): 65-71.
- [11] 田晓飞,李成亮,张民,等. 钾肥用量对大蒜-棉花套作体系产量和土壤钾素有效性的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3): 277-290.
- [12] 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 [J]. Pedosphere, 2010, 20(3): 368-377.
- [13] Zhao J Q, Zhao F Q, Jian G L, et al. Intensified *Alternaria* spot disease under potassium deficiency conditions results in acceleration of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) leaf senescence [J]. Australian Journal of Crop Science, 2013, 7(2): 241-248.
- [14] Yang X Y, Geng J B, Li C L, et al. Combined application of polymer coated potassium chloride and urea improved fertilizer use efficiencies, yield and leaf photosynthesis of cotton on saline soil [J]. Field Crops Research, 2016, 197: 63-73.
- [15] 耿计彪,张超,王学波,等. 一种含缩节胺的棉花专用控释尿素及其制备方法[P]. 发明专利, 2018, 公布号: CN 108840743.
- [16] Das D, Nayak A K, Thilagam V K, et al. Measuring potassium fractions is not sufficient to assess the long-term impact of fertilization and manuring on soil's potassium supplying capacity [J]. Journal of Soils & Sediments, 2018, 3: 1-15.
- [17] 束红梅,郭书巧,巩元勇,等. 油菜素内酯对NaCl胁迫下棉花叶片生理特征和基因表达谱的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(1): 150-156.
- [18] 王雷山,黄颖,宋兴虎,等. 棉花产量因主茎不同叶位叶绿素含量变化对播期和密度的响应[J]. 棉花学报, 2017, 29(2): 186-194.
- [19] 张国伟,杨长琴,刘瑞显,等. 施氮量对麦后直播棉钾素吸收利用的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(10): 3228-3236.
- [20] 严根土,马宗斌,黄群,等. 黄河中游滩区植棉适宜的缩节胺用量研究[J]. 中国棉花, 2014, 41(7): 23-27.
- [21] Ren X, Zhang L, Du M, et al. Managing mepiquat chloride and plant density for optimal yield and quality of cotton [J]. Field Crops Research, 2013, 149: 1-10.
- [22] 邢晋,张思平,赵新华,等. 种植密度和缩节胺互作对棉花株型及产量的调控效应[J]. 棉花学报, 2018, 30(1): 53-61.
- [23] Yang F, Du M, Tian X, et al. Plant growth regulation enhanced potassium uptake and use efficiency in cotton [J]. Field Crops Research, 2014, 163: 109-118.
- [24] 王宁,田晓莉,段留生,等. 缩节胺浸种提高棉花幼苗根系活力中的活性氧代谢[J]. 作物学报, 2014, 40(7): 1220-1226.
- [25] Islam A, Karim A J M S, Solaiman A R M, et al. Eight-year long potassium fertilization effects on quantity/intensity relationship of soil potassium under double rice cropping [J]. Soil and Tillage Research, 2017, 169: 99-117.

- [26] Harmon X, Christopher N B C, Gwathmey O, et al. Selecting cotton yield response function to estimate profit-maximizing potassium fertilization rates for cotton production in Tennessee [J]. Journal of Plant Nutrition, 2017, 40 (11): 457-464.
- [27] 田晓飞, 李成亮, 张民, 等. 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 [J]. 土壤学报, 2017, 54 (4): 967-977.
- [28] 章明奎, 方利平. 砂质农业土壤养分积累和迁移特点的研究 [J]. 水土保持学报, 2006, 20 (2): 46-49.
- [29] 王婷, 周海燕, 李利利, 等. 长期不施化学钾肥对陇东旱塬作物产量及土壤速效钾含量的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2015 (5): 44-49.

Effects of controlled-release potassium chloride containing mepiquat chloride on leaf physiology and soil potassium fraction of cotton

YU Qi-qing, GENG Ji-biao*, YANG Yu-kun, WANG Jia, YU Wen-yong, ZHAO Wei, LIU Qian-jin, YANG Xiu-yi* (Shandong Provincial Key Laboratory of Water and Soil Conservation and Environmental Protection, College of Resources and Environment/Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Linyi University, Linyi Shandong 276000)

Abstract: Potassium is an essential nutrient element of cotton, mepiquat chloride (MC) is an important regulator to control the vigorous growth of cotton plant. A field experiment was conducted to investigate the effects of controlled-release potassium chloride containing mepiquat chloride (CRKMC) on leaf physiology and soil potassium fraction, in order to reduce frequency application of potassium and MC, and also realize the integrated control of MC and K under the same time/space conditions. Five treatments were conducted with three replicates: no K fertilization, common KCl, controlled-release KCl, CRKMC, CRKMC with reduced 20% K dosage. The results showed that: CRKMC significantly increased the content of chlorophyll b and soluble protein, enhanced the activity of superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD), reduced malondialdehyde content, compared with KCl treatment. However, the types of K fertilizers had no significant effect on chlorophyll a. During the growth period of cotton, the water-soluble potassium in soil showed a decreased trend, the available potassium and exchangeable potassium showed trend with fluctuated dynamically, but the contents of different fraction potassium of CRKMC significantly increased than KCl treatment. The lint yield of CRKMC increased by 13.31%, Agronomic use efficiency increased by $2.19 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, compared with KCl treatment at the same K dosage fertilization. Even with the reduced potassium by 20% of CRKMC, the lint yield increased by 9.20% compared with KCl treatment. Therefore, the basal application of CRKMC improved the physiological characteristics of leaves, delayed the senescence of leaves, and adjusted different fraction of potassium, which was beneficial to realize the cultivation of cotton with light simplification and high yield.

Key words: controlled-release potassium chloride containing mepiquat chloride; cotton; yield; leaf physiology; potassium fraction