

DOI: 10.11766/trxb201907120286

杨修一, 于起庆, 耿计彪, 杨玉坤, 王嘉, 刘前进. 包膜含缩节胺氯化钾对棉花产量及土壤钾素的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(6): 1439-1448.

YANG Xiuyi, YU Qiqing, GENG Jibiao, YANG Yukun, WANG Jia, LIU Qianjin. Effects of Coated Potassium Chloride Containing Mepiquat Chloride on Cotton Yield and Soil Potassium[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(6): 1439-1448.

包膜含缩节胺氯化钾对棉花产量及土壤钾素的影响*

杨修一, 于起庆, 耿计彪[†], 杨玉坤, 王嘉, 刘前进

(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: 棉花是具无限生长特性的喜钾作物, 为解决其生育期内多次追施钾肥和叶面喷施缩节胺的用工问题, 实现轻简化种植目标, 研究包膜含缩节胺氯化钾对棉花产量、经济效益和土壤钾素变化特征的影响。试验设 5 个处理, 分别为一次基施 180 kg·hm⁻² 包膜含缩节胺氯化钾 (CRKMC)、减少 30% 钾素用量 (126 kg·hm⁻²) 的包膜含缩节胺氯化钾 (70%CRKMC)、基施 180 kg·hm⁻² 普通包膜氯化钾 (CRK)、分次施用 180 kg·hm⁻² 普通氯化钾 (KCl) 和对照 (CK, 不施钾肥), 后三个处理叶面喷施三次缩节胺。结果表明: 等量施钾条件下, CRKMC 和 CRK 较 KCl 籽棉产量分别增加 8.81% 和 9.36%, 经济效益分别增加 15.53% 和 12.86%, 70%CRKMC 较 KCl 增产 6.53%, 增加净收入 13.64%。CRKMC 抑制棉花盛花期前的株高, 提高后期株高、茎粗和叶绿素含量, 使生物量较 KCl 增加 18.56%~24.98%, 提高钾素吸收量, 表观利用率增加 25.06~38.83 个百分点。CRKMC 中的钾素和缩节胺在土壤中呈“先慢后快而后趋于平缓”的规律, 释放高峰出现在盛花期至始絮期, 显著提高蕾期以后土壤中的速效钾含量。因此, 土壤基施包膜含缩节胺氯化钾, 可合理协调棉花生长势指标, 满足钾素吸收需求, 减少 30% 用量仍有较高的经济效益和钾素利用率, 实现了缩节胺和钾素在同一时空条件下的一体化调控, 有助于棉花减肥、高产和轻简化种植。

关键词: 包膜含缩节胺氯化钾; 棉花; 钾素利用效率; 土壤速效钾; 经济效益

中图分类号: S158.3; S562 **文献标志码:** A

Effects of Coated Potassium Chloride Containing Mepiquat Chloride on Cotton Yield and Soil Potassium

YANG Xiuyi, YU Qiqing, GENG Jibiao[†], YANG Yukun, WANG Jia, LIU Qianjin

(Shandong Provincial Key Laboratory of Water and Soil Conservation and Environmental Protection, College of Resources and Environment/College of Agricultural and Forestry Science, Linyi University, Linyi, Shandong 276000, China)

Abstract: [Objective] Potassium is a main nutrient element that affects cotton yield and fiber quality. Repeated application of potassium fertilizer can increase cotton yield, but topdressing not only causes mechanical damage to the crop, but also

* 山东省自然科学基金项目 (ZR2018PD001)、中国博士后科学基金资助项目 (2017M622120) 和国家自然科学基金项目 (41571261) 资助 Supported by the Natural Science Foundation of Shandong Province of China (No. ZR2018PD001), the Postdoctoral Science Foundation of China (No. 2017M622120) and the National Natural Science Foundation of China (No. 41571261)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: gengjibiao@126.com

作者简介: 杨修一 (1992—), 男, 博士, 讲师, 主要从事新型肥料研制。E-mail: woshiyangxiuyi@163.com

收稿日期: 2019-07-12; 收到修改稿日期: 2019-08-29; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2019-10-29

increases labor cost, thus reducing cotton planting benefits. Mepiquat chloride (MC) is a kind of plant growth regulator characterized by low toxicity and water solubility. It is now widely used in cotton planting countries all over the world to inhibit vegetative growth of the plant and hence to eliminate the traditional labor-costing pruning operations. However, so far little is known about whether MC could increase cotton yield when it is applied into the cotton fields. Therefore, the objective of this study is to investigate effects of coated potassium chloride containing MC on cotton yield, economic benefit and balance of soil potassium. **【Method】** A field experiment was initiated in 2018 with five treatments different in potassium application pattern and three replicates for each treatment, i.e. Treatment CRKMC (basal application of $180 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ coated potassium chloride containing mepiquat chloride); Treatment 70% CRKMC (reduced potassium dosage ($126 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) or 70% of CRKMC); Treatment CRK (basal application of $180 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ common coated potassium chloride); Treatment KCl (split application of $180 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ordinary potassium chloride, 60% basal and 40% topdressing at the first bloom stage); and CK (no potassium fertilizer used), and in addition foliar spraying of MC was performed three times on each of the latter three treatments. **【Result】** Treatment CRKMC and CRK increased cotton yield by 8.81% and 9.36%, and economic benefit of the crop by 15.53% and 12.86%, respectively, while Treatment 70%CRKMC increased cotton yield by 6.53% and net income by 13.64%, respectively as compared with Treatment KCl. Treatment CRKMC inhibited cotton plant height before the full-bloom stage, but increased plant height, stem diameter and chlorophyll value at later stages (from the full-bloom stage to maturity stage), and plant biomass by 18.56%~24.98%, as compared with Treatment KCl, enhanced potassium uptake, and also improved apparent K use efficiency by 25.06%~38.83%. Release of Potassium and MC in the CRKMC exhibited a trend of “slow – fast – leveling off” in the soil, and peaked during the period between the full bloom stage and the initial boll-opening stage, which significantly increased the content of available potassium in the soil after the squaring stage. **【Conclusion】** Therefore, application of CRKMC into soil can reasonably regulate the growth potential indices of cotton and meet the demand of cotton for potassium. The application of CRKMC 30% less in potassium dosage can still improve economic benefits of the crop and potassium use efficiency. So CRKMC can realize integrated coordination of MC and K under the same temporal/spatial conditions, which helps reduce fertilization rate, improve crop yield and simplify crop management.

Key words: Coated potassium chloride containing mepiquat chloride; Cotton; Potassium use efficiency; Soil available potassium; Economic benefit

钾是影响棉花纤维品质和产量的主要元素,合理施用钾肥可增加叶片叶绿素,促进光合作用,提升棉花产量,改善纤维品质^[1-2]。但是我国钾资源贫乏,且钾肥利用率仅为 21.12%~35.19%^[3-4];随着棉花品种改善和氮磷肥大量施用,棉株对土壤钾素的吸收量逐渐增加,导致部分地区钾素耗竭日趋严重,缺钾土壤面积不断增加^[5],因缺钾导致的早衰已成为我国棉花高产的主要限制因子。研究^[6]表明,棉花钾素吸收高峰出现在初花期至吐絮期阶段,而一次性施入钾肥很难与其需钾规律相吻合,造成钾素损失。多次施用钾肥可增加棉花产量,但追肥不仅对棉花造成机械损伤,又增加用工成本,降低植棉效益^[7]。因此,具有简化施肥、提高钾素利用率的新型包膜钾肥是解决上述问题的重要途径^[8-9]。

棉花具无限生长特性,平衡库源关系是棉株正常生长的保证。缩节胺 (Mepiquat chloride, MC)

具有低毒、易溶于水的特点,可塑造理想株型和群体结构,通过抑制营养生长,省去传统整枝操作,节约大量劳力^[10],在世界植棉国中广泛应用。MC 可经叶片或根部吸收,但根部施用的量和时间不易控制且施用工序较复杂,故多采用叶面喷施或浸种的形式调节棉花生长势^[11]。由于 MC 的有效期为 15~20 d,传统种植模式下,棉花生育期内需喷施 3~5 次,以优化冠层结构^[12]。关于缩节胺的喷施剂量已有较多研究^[11, 13],但其适宜用量和施用时间的选择常因人而异,不利于技术的标准化,也易因把握不当造成减产;并且多次喷施,会增加人工投入。现阶段中国农村劳动力大量转移、劳动力价格持续上涨,致使生产工序繁多、用工量大的棉花种植面积逐渐下降^[14]。为此,本试验以包膜氯化钾为载体,利用其缓慢、长期释放养分的特点,添加适当量的缩节胺,研究一次性施用包膜含缩节胺氯化钾对棉

花生长、产量及土壤钾素的影响。研究结果为实现缩节胺和钾素在同一时空条件下的一体化调控提供技术支撑，为棉花高产与轻简化栽培以及新型多功能性包膜肥料的研发和推广提供理论依据。

1 材料与amp;方法

1.1 试验材料

试验于2018年4月在山东省沂南县牛家小河试验基地(35°7'4"N, 118°16'50"E)进行, 该地属温带季风气候, 降水集中在7—9月, 当年降水量为968 mm, 平均温度14.3 °C。耕层土壤(0~20 cm)中砂粒含量556.7 g·kg⁻¹, 粉粒239.4 g·kg⁻¹, 黏粒203.9 g·kg⁻¹, 为砂质壤土。供试土壤基本理化性质为: pH 6.35, 全氮和有机质含量分别为0.87和6.4 g·kg⁻¹, 硝态氮、铵态氮、速效钾、有效磷分别为54.56、22.59、167.7和36.02 mg·kg⁻¹。

供试肥料包括树脂包膜含缩节胺氯化钾(CRKMC, 将氯化钾粉末倒入圆盘造粒机, 把缩节胺按照比例配成溶液, 缓慢喷入氯化钾粉末内进行造粒, 筛选出3~5 mm的颗粒进行烘干, 等表面均匀、光滑后进行包膜, 包膜材料为环氧树脂, 包膜厚度4%; 成品包膜含缩节胺氯化钾中含缩节胺8 g·kg⁻¹, K₂O 531.8 g·kg⁻¹, 25 °C静水释放期为四个月), 包膜氯化钾(CRK, 含K₂O 544.3 g·kg⁻¹, 25 °C静水释放期为四个月), 两种包膜钾肥的包膜工艺和材料一致, 普通氯化钾(KCl, 含K₂O 570.0 g·kg⁻¹), 树脂包膜控释尿素(含N 441.0 g·kg⁻¹, 25 °C静水释放期四个月)和磷酸二铵(含氮180.0 g·kg⁻¹, 含P₂O₅ 460.0 g·kg⁻¹)。

1.2 试验设计

试验共设五个处理, 每个处理重复三次, 采用单因素随机区组设计, 分别为(1)一次基施180 kg·hm⁻²包膜含缩节胺氯化钾(CRKMC); (2)减少30%钾素用量的包膜含缩节胺氯化钾(70% CRKMC), 即一次基施126 kg·hm⁻²; (3)一次基施180 kg·hm⁻²普通包膜氯化钾(CRK); (4)施用180 kg·hm⁻²普通氯化钾(KCl), 其中基施60%, 初花期追施40%; (5)不施钾肥作为对照(CK)。小区面积为30 m²(宽5 m, 长6 m), 所有氮和磷养分由控释尿素和磷酸二铵提供, 施用量分别为180 kg·hm⁻²(以N计)和150 kg·hm⁻²(以P₂O₅计),

先根据施磷量计算磷酸二铵的用量, 然后根据总施氮量减去磷酸二铵所提供的氮量, 确定控释尿素的施用量, 肥料均在播种前一次性基施。处理(3)、(4)和(5)叶面喷施三次缩节胺(依据当地施用习惯), 时间分别为蕾期(45 g·hm⁻²)、初花期(90 g·hm⁻²)和盛铃期(120 g·hm⁻²), 各处理均不打顶, 其他农艺管理措施按照农民习惯, 且各小区保持一致。

供试棉花品种为鲁棉研28号, 采用双垄地膜覆盖种植, 大行距80 cm, 小行距60 cm, 株间距为35~40 cm, 平均种植密度为每公顷48 000株。试验前制作宽8 cm、长10 cm的尼龙网袋, 称取CRKMC颗粒10 g, 装入网袋中然后封口。在CRKMC处理小区内, 相距播种行一侧10 cm处, 挖一条深8 cm、宽12 cm的沟, 将35个肥料网袋平铺于沟底, 并使网袋中的肥料颗粒均匀散开, 覆土至沟平, 用以测定CRKMC在田间土壤中的释放特征。

1.3 样品采集与测定

2018年4月20日播种, 于5月13日(苗期, 播种后23 d)、6月8日(蕾期, 播种后49 d)、7月7日(盛花期, 播种后78 d)、8月4日(盛铃期, 播种后108 d, 该期只测株高、茎粗、叶绿素相对含量(SPAD)值, 未取土壤样品)、8月30日(始絮期, 播种后132 d)、11月2日(收获结束, 播种后196 d)分别进行样品的采集和测定。其中, 土壤样品按照对角线法, 用土钻采集五点耕层土壤, 混匀后带回实验室风干, 并过10目筛。将过筛的样品用醋酸铵浸提, 火焰光度计法测定速效钾含量^[15]。用游标卡尺和直尺测量不同时期棉花的茎粗和株高, SPAD值采用手持叶绿素仪(SPAD-502型, 日本美能达公司)进行测定。每次挖取4个肥料网袋, 带回实验室, 用清水冲洗掉泥土, 剪开网袋将肥料转移至铝盒, 烘干至恒重, 采用“失重法”测定释放量, 即测定前后的重量差值视为氯化钾和缩节胺的释放量^[9], 试验中粗略认为缩节胺和氯化钾同步释放。

由于棉花生育期长, 后期落叶、落花严重, 为精确测定生物量, 在盛花期以后每隔15 d采集5株代表性植株的落叶、落花和落桃, 其中的花、籽棉和棉壳共同作为生殖器官的生物量。收获结束期, 齐根收取地上部分, 取回的植株于105 °C的烘箱内杀青40 min, 然后70 °C烘干至恒重, 磨碎后采用H₂SO₄-H₂O₂联合消煮, 全钾含量由火焰光度计(FP

6400 数显火焰光度计,上海隆拓仪器设备有限公司)测定,根据叶片、茎和生殖器官部分吸钾量,计算棉株的总吸钾量。

自始絮期开始,视棉铃吐絮情况,共采收 7 次,所有产量之和即为小区籽棉产量,然后换算为每公顷的产量。在第三次采收时,连续收取 100 朵盛开的棉铃,计算单铃重;直径大于 2 cm 的棉铃记为每株的桃数。

1.4 数据处理

经济效益核算:肥料成本按照市场价格尿素 1 600 yuan·t⁻¹,控释尿素 2 400 yuan·t⁻¹,磷酸二铵 3 000 yuan·t⁻¹,普通颗粒氯化钾 2 500 yuan·t⁻¹,包膜氯化钾 3 500 yuan·t⁻¹,包膜含缩节胺氯化钾 4 000 yuan·t⁻¹ 计算;籽棉收入根据平均市场价格计算,籽棉 8 yuan·kg⁻¹;每一次施肥劳动力按当地平均劳动力水平 450 yuan·hm⁻²,其中氯化钾处理追肥一次,其余一次性基施,每一次叶面喷施缩节胺按 300 yuan·hm⁻² 计算,包膜含缩节胺氯化钾不额外喷施,其余处理喷三次;其他消耗投入包括整地、播种、灌溉、多次收获采摘用工以及种子、农药、地膜等农用消耗,一共按照 3 000 yuan·hm⁻² 进行计算。

肥料利用率的计算方法,根据表观利用率=(施钾区棉株吸收总钾量-空白区植株吸钾量)/所施钾量^[4] 计算。

采用 Microsoft Excel 2012 对数据进行预处理,经 SAS 8.0 统计软件用最小差异显著法(LSD)进行多重比较,并进行差异性显著分析($P < 0.05$)及方差分析(Analysis of Variance—ANOVA)。文中所有数据均为三次重复的平均值,处理后的数据采用 Sigmaplot 12.5 作图。

2 结果

2.1 包膜含缩节胺氯化钾对棉花产量及生物量的影响

不同施钾处理对棉花产量及产量构成要素产生显著影响(表 1),CRK 与 CRKMC 处理单株结铃数最多,分别达到 21 和 21.08 个,其余三个处理差异不显著;施钾处理间单铃生物量未表现出显著差异,保持在 5.41~5.64 g,但较 CK 显著增加;CK 籽棉产量显著低于其他处理,CRK、CRKMC 和 70%CRKMC 间差异不显著,较 KCl 增产 6.53%~9.36%。

表 1 不同施钾处理棉花的产量及其构成要素

Table 1 Yield and yield components of the cotton relative to treatment

处理 Treatment	单株铃数 Bolls	单铃生物量 Boll biomass/ g	籽棉 Seed cotton yield/ (kg·hm ⁻²)	较 KCl 增产率 Increase rate than KCl/ %
CK	17.83b	4.90b	3 351.1c	-7.14
KCl	18.92b	5.43a	3 608.9b	0
CRK	21.00a	5.64a	3 946.7a	9.36
CRKMC	21.08a	5.41a	3 928.9a	8.87
70%CRKMC	18.75b	5.52a	3 844.4ab	6.53

注:CK 表示不施钾肥;KCl 表示施用氯化钾;CRK 表示施用包膜氯化钾;CRKMC 表示施用包膜含缩节胺氯化钾;70%CRKMC 表示施用减量 30%的包膜含缩节胺氯化钾。表中不同小写字母表示同列数值经最小差异显著法比较,在 $P < 0.05$ 水平上差异显著,下同。Note: CK means no K fertilization; KCl means application of KCl; CRK means application of coated KCl; CRKMC means application of coated potassium chloride containing mepiquat chloride; 70%CRKMC means application of coated potassium chloride containing mepiquat chloride with 30% reduction of potassium dosage. Means within the same column followed by different lowercase letters are significantly different at $P < 0.05$ levels according to the Duncan multiple range test. The same below.

施钾处理间的叶片生物量无显著差异(表 2),在 3 763~4 447 kg·hm⁻²,CRKMC 与 70%CRKMC 显著高于 CK,分别增加 23.89%和 31.02%,然而 CK 与 KCl、CRK 间无显著差异;CRKMC 的茎生物量最大,为 7 432 kg·hm⁻²,显著高于 CK 和 KCl 处

理,三个包膜钾肥间差异不显著;施钾增加棉花生殖器官重量,其中 CRK、CRKMC 与 70%CRKMC 显著高于 KCl,但这三个处理间差异不显著;因此,棉花总生物量表现出与各部分生物量相似的趋势,CRK、CRKMC 与 70%CRKMC 无显著差异,其中

表 2 不同施钾处理棉花的生物量

Table 2 Biomass of the cotton relative to treatment / (kg·hm⁻²)

处理 Treatment	叶 Leaf	茎 Stem	生殖器官 Genital	总生物量 Total biomass
CK	3 394b	4 757c	5 935c	14 086d
KCl	3 763ab	5 296b	6 749b	15 809c
CRK	4 133ab	6 990ab	7 607a	18 730ab
CRKMC	4 205a	7 432a	7 879a	19 758a
70%CRKMC	4 447a	6 885ab	7 753a	18 743ab

CRKMC 最大, 显著高于 CK 和 KCl, 且较 KCl 显著增加 24.98%, 70%CRKMC 较 KCl 显著增加 18.56%。

2.2 包膜含缩节胺氯化钾对棉花钾素吸收量及钾素利用率的影响

不同施肥处理对棉花的生物量产生影响, 因此植株的钾素吸收量也表现出显著差异(图 1a)), CK 处理植株钾素吸收最少, 为 287.5 kg·hm⁻², CRKMC 钾素吸收量最大, 达到 406.2 kg·hm⁻², 显著高于 CRK 和 KCl, 与 70%CRKMC 差异不显著; 同时 70%CRKMC 与 CRK 未表现出显著差异, 但较 KCl 增加 7.67%。由于 70%CRKMC 减少 30%钾素用量, 因此该处理的钾素表观利用率最高(图 1b)), 达到 79.61%, 较 CRK 和 KCl 分别增加 28.07 和 38.83 个百分点; CRKMC 与 CRK 间无显著差异, 但较 KCl 提高 25.06 个百分点。

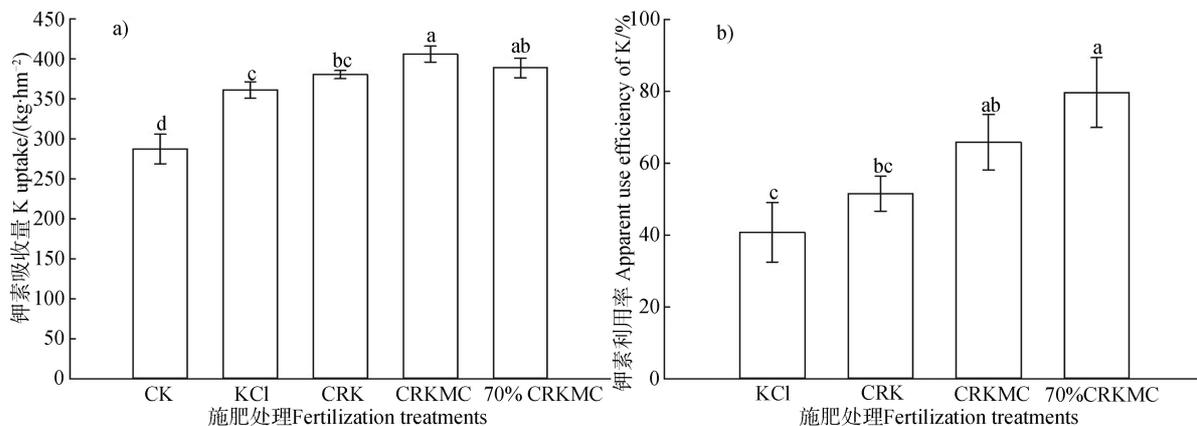
2.3 不同施钾处理棉花的经济效益

由于各处理籽棉产量不同, 毛收入随之发生变

化(表 3), CK 毛收入最低, 为 26 809 yuan·hm⁻², 相同施钾量下, CRK 和 CRKMC 显著高于 KCl, 减 30%钾量的 70%CRKMC 处理与 KCl 无显著差异; 因生产工艺技术不同, CRKMC 的肥料成本最高, 但是其较普通氯化钾减少了一次追肥用工和三次叶面喷施缩节胺的用工, 因此, CRKMC、70%CRKMC 和 CRK 净收入无显著差异, 但较 KCl 分别增加经济效益 15.53%、13.64%和 12.86%。

2.4 包膜含缩节胺氯化钾对棉花生长及叶绿素的影响

随生育期进行, 各处理棉花的株高(图 2a)) 和茎粗(图 2b)) 呈逐渐上升趋势, 不同处理在各生育期表现出较大差异, CK 各时期均处于最低值。具体表现为: 蕾期之前, KCl 棉花的株高显著高于其他处理, 其余四个处理间差异不显著; 盛花期属于营养生长和生殖生长的旺盛期, 各处理株高差异不显著; 但是自盛铃期至始絮期, CRKMC 和 70%



注: 不同字母表示处理间差异达 5%显著水平, 下同。Note: Different letters indicate significant difference at 5% level. The same below.

图 1 不同施钾处理棉花钾素吸收量 (a)) 和钾素利用率 (b))

Fig. 1 Potassium uptake (a) and potassium use efficiency (b) of cotton plant relative to treatment

表 3 不同施钾处理棉花的经济效益分析

Table 3 Economic benefit analysis of the cotton relative to treatment / (yuan·hm⁻²)

处理 Treatment	毛收入 Revenue	肥料 Fertilizer cost	施肥用工 Labor cost of fertilization	喷缩节胺用工 Labor cost of spraying MC	其他消耗 Other cost	净收入 Net profit
CK	26 809c	1 660	450	900	3 000	20 799b
KCl	28 871bc	2 443	900	900	3 000	21 628b
CRK	31 574a	2 815	450	900	3 000	24 409a
CRKMC	31 431a	2 993	450	0	3 000	24 988a
70%CRKMC	30 755ab	2 727	450	0	3 000	24 579a

注：其他消耗投入包括整地、播种、灌溉、多次收获采摘用工以及种子、农药、地膜等材料。Note: Other costs including land preparation, sowing, irrigation, split-harvesting, seeds, pesticides, mulch, and other materials.

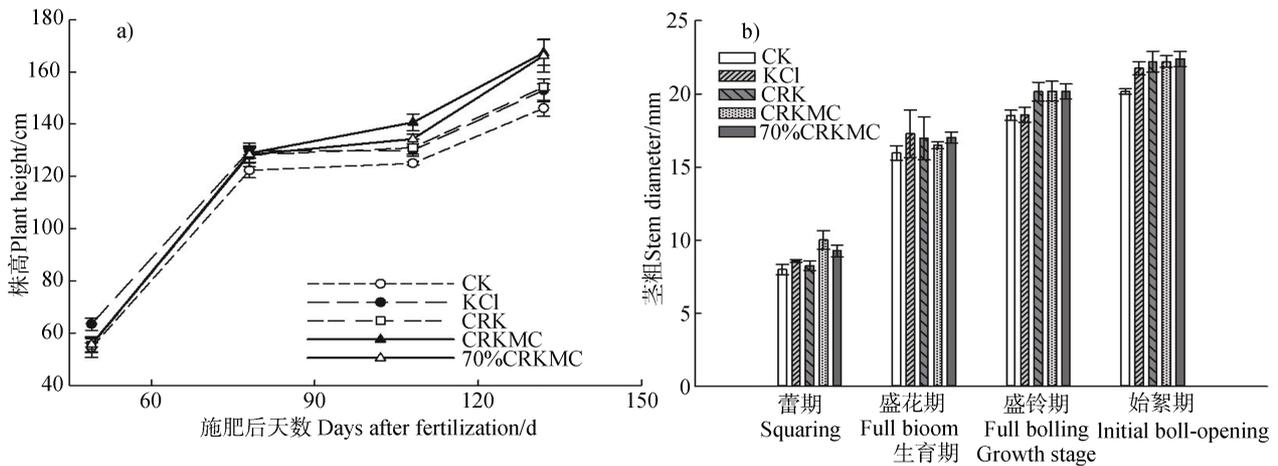


图 2 不同施钾处理棉花的株高 (a) 和茎粗 (b)

Fig. 2 Plant height (a) and stem diameter (b) of the cotton relative to treatment

CRKMC 处理的株高显著高于其他处理，始絮期时分别达到 167.3 和 166.2 cm, 较 KCl 处理增加 9.37% 和 8.64%，但是 KCl 与 CRK 未表现出显著差异。蕾期时，CRKMC 和 70%CRKMC 棉花的茎粗无显著差异，但显著大于其他处理；盛花期各处理差异不显著，保持在 15.96~17.27 mm；盛铃期 CRKMC、70%CRKMC 和 CRK 无显著差异，但显著高于 KCl；始絮期时，包膜含缩节胺氯化钾处理的茎粗最大，各施钾处理间差异不显著。

施钾可提高叶片叶绿素 SPAD 值，随生育期进行，各处理 SPAD 值呈先升高后降低的趋势，拐点出现在盛铃期 (图 3)。蕾期时，70%CRKMC 和 CK 差异不显著，低于其他三个施钾处理；盛花期，KCl 和 CRKMC 显著高于 CRK 和 70%CRKMC；盛铃期

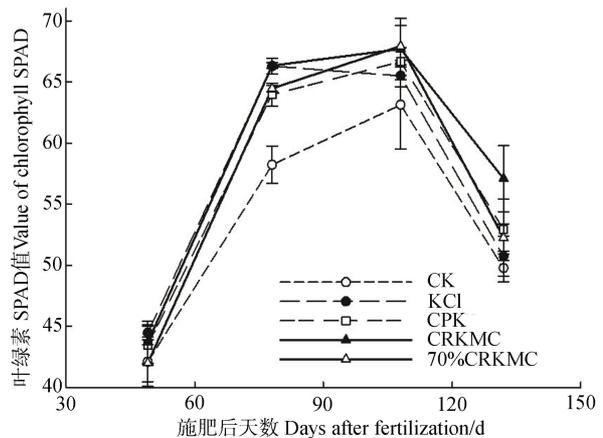


图 3 不同施钾处理棉花叶片叶绿素相对含量 (SPAD) 值的变化特征

Fig. 3 Variation of chlorophyll by soil and plant analyzer development (SPAD) in cotton leaf relative to treatment

包膜钾肥处理高于普通氯化钾，包膜含缩节胺氯化钾高于普通包膜氯化钾；始絮期时 CRKMC 分别较 KCl 和 CRK 显著增加 12.56% 和 7.87%，但是 70%CRKMC 和 CRK 之间未表现出显著差异。

2.5 包膜含缩节胺氯化钾养分释放特征及对土壤速效钾含量的影响

包膜含缩节胺氯化钾在田间土壤中的释放呈现“先慢后快而后趋于平缓的”规律（图 4a），第一

天的初期溶出率仅为 1.26%，一直到苗期（23 d）属于养分释放迟滞期，共释放 8.99%；随后自苗期至始絮期（132 d）属于养分释放加速期，释放高峰出现在盛花期（78 d）至始絮期，平均每天养分溶出率达到 0.82%，至始絮期养分累积释放率为 83.51%，该加速期内共释放 74.52%；自始絮期至收获结束期（196 d）养分释放趋于平缓，收获结束时共释放养分 94.71%。

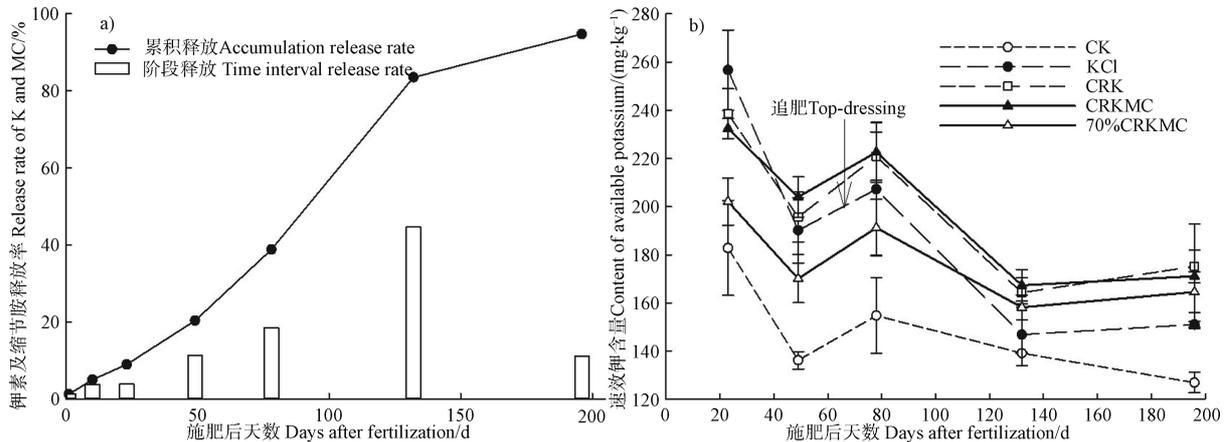


图 4 包膜含缩节胺氯化钾在土壤中的养分释放特征 (a) 和不同生育期土壤速效钾含量变化特征 (b))

Fig. 4 Nutrients release characteristics of coated KCl containing MC in soil (a) and change in available K content in soil relative to treatment (b))

土壤中的速效钾呈蕾期下降、盛花期上升、然后逐渐下降的变化趋势（图 4b），其中 CK 在各时期均处于最低水平值。具体而言，苗期时，KCl 速效钾含量最高，自蕾期以后显著低于 CRK 和 CRKMC，但是蕾期和盛花期高于 70%CRKMC；同等施钾量下，CRKMC 与 CRK 在各时期差异均不显著，减量施钾处理在苗期至盛花期显著低于全量包膜钾肥处理，始絮期和收获结束期，三个处理间未表现出显著差异。

3 讨论

3.1 包膜含缩节胺氯化钾对棉花生长及经济效益的影响

缩节胺可控制棉花营养生长，降低植株高度，形成紧凑株型^[16]。在棉花生育期内喷施 3~5 次，可抑制主茎和果枝生长，促进有限的同化物优先向棉铃运输^[17]。高密度种植时，在蕾期、花期、铃期和吐絮期喷施四次可增加铃重和纤维强度^[18]；但在晚播、高密度和低施肥的新型种植模式下，缩节胺的

施用会降低干物质的累积，减少籽棉产量^[19]，并且其适宜用量与棉田施钾量密切相关^[20]。本试验中，CRKMC 养分释放后，经根部吸收后降低蕾期前棉花的株高和叶绿素，增加茎粗，对棉花的生长产生抑制作用，形成矮壮苗。这是因为 MC 可以提高根系氨基酸的合成能力，增加伤流液泌量，活性氧系统代谢得到改善^[21]，而经根转移至地上部时，降低体内赤霉素的活性，抑制细胞伸长^[22]，降低株高。棉花是双子叶作物，播种保苗难度大，矮壮苗是高产稳产的基础环节^[23]，为籽棉产量的提高奠定物质基础。盛花期时 CRKMC 处于缩节胺释放加速期，其与叶面喷施缩节胺处理的棉株生长势差异不显著，但是生长后期（盛花期以后）对棉株生长势的调控作用减弱，株高（图 2a）、茎粗（图 2b）和叶绿素 SPAD 含量（图 3）显著高于叶面喷施缩节胺的处理。这意味着根施 CRKMC 对植株的控制先弱后强，符合棉花“前轻后重”的生长控制要求；但缩节胺加速释放后的平缓期，不能满足植株生长后期的调控，控制效果劣于叶面喷施，这与田晓莉等^[24]用淀粉基缓释缩节胺对棉籽进行包衣得到的结

论相似。

由于后期调控作用减弱, CRKMC 和 70%CRKMC 处理生物量较 KCl 分别增加 24.98% 和 18.56%, 相应的钾素吸收量提高, 钾素利用率增加 25.06% 和 38.83%, 但籽棉产量仅分别增加 8.87% 和 6.53% (表 1), 说明并非钾素利用率越高产量就越高, 也可能是由于营养生长过旺造成的, 试验中叶生物量和茎生物量 (表 2) 的显著增加很好地证明这一观点。出现该现象的原因, 可能是缩节胺在土壤和棉籽中的半衰期较短, 分别为 9.58 和 3.17 d^[13], 其在土壤中释放后, 不能及时被根系吸收, 而降解后不再起调控生长的作用; 也可能是包膜含缩节胺氯化钾中的缩节胺含量较低 (0.8%), 总量不能满足棉株调控需求^[25]。

CRKMC 由于减少钾素追施和缩节胺叶面喷施的用工, 经济效益与 CRK 无显著差异, 但显著高于 KCl (表 3), 表明在棉田中施用 CRKMC 在经济上可行, 可解决叶面喷施浪费严重、污染环境和调节滞后的缺点^[26], 利于实现棉花轻简化种植。本试验中认为缩节胺和钾素同步释放, 但由于分子半径和化学性质的不同, 其释放顺序及释放量可能存在差异, 关于 CRKMC 中缩节胺的释放特征以及适宜添加上限量, 需在以后的试验中进一步探索。

3.2 包膜含缩节胺氯化钾对棉田土壤速效钾含量的影响

土壤钾素的含量、分布及其植物有效性是影响土壤供钾能力的主要因素^[27-29], 合理供钾可显著提高棉花铃重和产量^[30]。本试验中, 在苗期和盛花期各处理土壤钾素含量较高 (图 4b)), 一方面由于所施钾肥溶解或释放, 另一方面可能是所施氮肥水解后的铵离子被吸附, 交换了钾离子, 使其进入土壤溶液所致^[2]。包膜钾肥蕾期前释放缓慢 (图 4a)), 土壤中速效钾含量低于易溶解的普通氯化钾处理, 但该时期棉花植株矮小, 钾素需求低, 较少的钾素供应可减少淋溶风险; 自蕾期以后, 由于包膜钾肥的缓慢累积释放, 增加土壤中速效钾含量, 这在本试验所用砂土 (保肥保水性能差) 中表现的更为明显。盛花期以后, CRKMC 速效钾显著高于 KCl, 为后期棉花钾素吸收和产量形成奠定了物质基础, 这与 Harmon 等^[7]在盛铃期补钾提高生育后期主茎叶片叶绿素含量和光合效率、延缓叶片衰老的结果基本一致。因此, 包膜含缩节胺氯化钾在棉田土壤

中的钾素释放可与棉花钾素吸收规律相吻合, 显著提高钾素利用率和籽棉产量。

4 结 论

包膜含缩节胺氯化钾在土壤中的钾素和缩节胺释放表现出“迟滞期-加速期-平缓期”的规律, 释放高峰出现在盛花期至始絮期, 显著提高蕾期以后土壤中的速效钾含量。CRKMC 可显著控制盛花期的棉花株高, 但后期对株高、茎粗和叶绿素等生长势指标的调控劣于叶面喷施缩节胺, 使生物量较 KCl 增加 18.56%~24.98%, 表观利用率增加 25.06~38.83 个百分点。等量施钾条件下, CRKMC 和 CRK 分别较 KCl 籽棉产量增加 8.81% 和 9.36%, 经济效益增加 15.53% 和 12.86%, 70%CRKMC 较 KCl 增产 6.53%, 增加净收入 13.64%。综上, 土壤基施包膜含缩节胺氯化钾, 可基本满足棉花生长势指标调控需求, 保证生育期内钾素供应, 且减少 30% 用量仍有较高的经济效益和钾素利用率, 在经济和技术上可行, 有助于棉花减肥、高产和轻简化种植。

参考文献 (References)

- [1] Dong H Z, Kong X Q, Li W J, et al. Effects of plant density and nitrogen and potassium fertilization on cotton yield and uptake of major nutrients in two fields with varying fertility[J]. *Field Crops Research*, 2010, 119(1): 106—113.
- [2] Geng J B, Ma Q, Zhang M, 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. [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.]
- [3] Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 915—924. [张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 915—924.]
- [4] 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[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(1): 123—131. [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]. 植物营养与肥科学报, 2012, 18 (1): 123—131.]
- [5] Li S T, Xing S L, Zhang Y, et al. Application rate and time of potash for high cotton yield, quality and balance of soil potassium[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22 (1): 111—121. [李书田, 邢素丽, 张炎, 等. 钾肥用量和施用时期对棉花产量品质和棉田钾素平衡的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2016, 22 (1): 111—121.]
- [6] 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[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12 (5): 662—666. [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[J]. 植物营养与肥科学报, 2006, 12 (5): 662—666.]
- [7] Harmon X, Boyer C N, Gwathmey C 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): 1547—1556.
- [8] Tian X F, Li C L, Zhang M, et al. Effects of controlled release potassium fertilizer on crop yields and soil potassium supply under cotton-garlic intercropping system[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54 (4): 967—977. [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]. 土壤学报, Acta Pedologica Sinica, 2017, 54 (4): 967—977]
- [9] 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.
- [10] Oswalt J S, Rieff J M, Severino L S, et al. Plant height and seed yield of castor (*Ricinus communis* L.) sprayed with growth retardants and harvest aid chemicals[J]. Industrial Crops and Products, 2014, 61: 272—277.
- [11] de Almeida A Q, Rosolem C A. Cotton root and shoot growth as affected by application of mepiquat chloride to cotton seeds[J]. Acta Scientiarum Agronomy, 2012, 34 (1): 61—65.
- [12] Iqbal M, Nisar N, Khan R S A, et al. Contribution of mepiquat chloride in drought tolerance in cotton seedlings[J]. Asian Journal of Plant Sciences, 2005, 4 (5): 530—532.
- [13] Li W X, Chen M, Chen W T, et al. Determination of mepiquat chloride in cotton crops and soil and its dissipation rates[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2012, 85: 137—143.
- [14] Li F, Wang X, Wang X R, et al. Cotton chemical topping with mepiquat chloride application in the north of Yellow River valley of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49 (13): 2497—2510. [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.]
- [15] 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[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53 (1): 213—223. [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[J]. 土壤学报, 2016, 53 (1): 213—223.]
- [16] Xing J, Zhang S P, Zhao X H, et al. Interaction of plant density with mepiquat chloride affects plant architecture and yield in cotton[J]. Cotton Science, 2018, 30 (1): 53—61. [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.]
- [17] Wang L, Mu C, Du M W, et al. The effect of mepiquat chloride on elongation of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) internode is associated with low concentration of gibberellic acid[J]. Plant Science, 2014, 225: 15—23.
- [18] Mao L, Zhang L Z, Evers J B, et al. Yield components and quality of intercropped cotton in response to mepiquat chloride and plant density[J]. Field Crops Research, 2015, 179: 63—71.
- [19] 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.
- [20] Zhou G S, Lin Y, Tong C, et al. Effects of potassium and mepiquat chloride on plant type and yield of high quality cotton[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2011, 50 (23): 4801—4803. [周桂生, 林岩, 童晨, 等. 钾肥和缩节胺对高品质棉株型和产量的影响[J]. 湖北农业科学, 2011, 50 (23): 4801—4803.]
- [21] Wang N, Tian X L, Duan L S, et al. Metabolism of reactive oxygen species involved in increasing root vigour of cotton seedlings by soaking seeds with mepiquat chloride[J]. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40 (7): 1220—1226. [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.]
- [22] Ren X, Zhang L Z, 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.
- [23] Dong H Z, Yang G Z, Li Y B, et al. Key technologies for light and simplified cultivation of cotton and their eco-physiological mechanisms[J]. Acta Agronomica Sinica, 2017, 43 (5): 631—639. [董合忠, 杨国正, 李亚兵, 等. 棉花轻简化栽培关键技术及其生理生态学机制[J]. 作物学报, 2017, 43 (5): 631—639.]
- [24] Tian X L, Xie X Y, Zhou C J, et al. Slow release characteristics of mepiquat chloride from starch matrices

- coated cotton seed[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41 (10): 3042—3051. [田晓莉, 谢湘毅, 周春江, 等. 棉籽包衣淀粉基缓释缩节安的释放特性[J]. *中国农业科学*, 2008, 41 (10): 3042—3051.]
- [25] Deng X X, Jiang H L, Peng J, et al. The effect of DPC dosage on physiology of cotton during flowering and boll-setting period[J]. *Journal of Shihezi University (Natural Science Edition)*, 2013, 31 (1): 1—5. [邓小霞, 江海澜, 彭俊, 等. 缩节胺剂量对花铃期棉花生理特性的研究[J]. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2013, 31 (1): 1—5.]
- [26] Lei B, Yun Y L, Zhang Y S, et al. Application of the multifunctional and slowly releasing of root use shrink-burl-amine to cotton[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2007, 44 (4): 502—505. [雷斌, 恽友兰, 张云生, 等. 根用多功能缓释缩节胺在棉花上的应用研究[J]. *新疆农业科学*, 2007, 44 (4): 502—505.]
- [27] Tian X F, Li C L, Zhang M, et al. Effects of potassium application rates on crop yield and soil potassium content in a garlic-cotton intercropping system under a four-year located experiment[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31 (3): 277—282, 290. [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—282, 290.]
- [28] Wang Z, Lu J W, Zhang W J, et al. Influential factors on soil available potassium evaluation in agriculture[J]. *Soils*, 2012, 44 (6): 898—904. [王箬, 鲁剑巍, 张文君, 等. 田间土壤钾素有效性影响因素及其评估[J]. *土壤*, 2012, 44 (6): 898—904.]
- [29] Dong Y H, Wang H Y, Zhou J M, et al. Preliminary study on potassium leaching characteristics of different soils[J]. *Soils*, 2014, 46 (2): 225—231. [董艳红, 王火焰, 周健民, 等. 不同土壤钾素淋溶特性的初步研究[J]. *土壤*, 2014, 46 (2): 225—231.]
- [30] Wang X, Mohamed I, Ali M, et al. Potassium distribution in root and non - root zones of two cotton genotypes and its accumulation in their organs as affected by drought and potassium stress conditions[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2019, 182 (1): 72—81.

(责任编辑: 陈荣府)