

控释钾肥对玉米产量、钾肥利用率和土壤速效钾的影响

张为涛¹, 刘之广^{1,2}, 张民^{1,2}, 董树亭¹, 陈剑秋², 刘文龙², 杨修一¹, 周洪印¹

(1. 山东农业大学泉林黄腐酸肥料工程实验室, 土肥资源高效利用国家工程实验室, 资源与环境学院, 农学院, 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 临沂 276700)

摘要: 通过玉米—小麦轮作条件下连续2年的大田定位试验, 以钾空白(CK)、普通氯化钾常量(K1)、普通氯化钾高量(K2)为对照处理, 研究通过控释氯化钾常量(CRK1)、控释氯化钾高量(CRK2)、氯化钾与控释氯化钾等比掺混常量(BBF1)、氯化钾与控释氯化钾等比掺混高量(BBF2)处理对玉米产量、钾肥利用率和土壤速效钾的影响。结果表明:(1)BBF2玉米—小麦季产量分别为11 697.8 kg/hm²和11 921.1 kg/hm², 增产和增收效果最好, 较K1分别显著增产13.3%和15.7%, 较K1分别显著增收16.6%和19.6%;(2)BBF2钾肥农学利用率较K1分别显著提高了49.0%和41.9%, 生理利用率较K1分别显著提高了17.6%和34.8%;BBF1钾肥表观利用率最高, 玉米—小麦分别为23.73%和35.22%;(3)施用钾肥显著提高了玉米的株高和茎粗;BBF2提高了玉米吐絮后期至成熟期的株高;CRK1、CRK2、BBF1、BBF2均提高了玉米吐絮后期叶片SPAD值。本试验条件下, 控释氯化钾与普通氯化钾掺混施用可满足玉米整个生育期的钾素需求, 提高玉米产量和钾肥利用率, BBF2处理为玉米最佳钾肥施用方案。

关键词: 控释氯化钾; 玉米; 产量; 钾肥利用率; 土壤速效钾

中图分类号:S143.3; S513 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2017)04-0241-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.04.038

Effects of Controlled-release Potassium Fertilizers on the Yield of Maize, Potassium Use Efficiency and Soil Available Potassium

ZHANG Weitao¹, LIU Zhiguang^{1,2}, ZHANG Min^{1,2}, DONG Shuting¹,

CHEN Jianqiu², LIU Wenlong², YANG Xiuyi¹, ZHOU Hongyin¹

(1. Engineering Laboratory for Quanlin Fulvic Acid Based Fertilizer, National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, College of Resources and Environment,

College of Agronomy, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018; 2. State Key Laboratory of Nutrition Resources Integrated Utilization, Kingenta Ecological Engineering Group Co., Ltd, Linshu, Shandong 276700)

Abstract: Effects of the usual controlled-release potassium chloride (CRK1), the high controlled-release potassium chloride (CRK2), the usual mixed potassium chloride with controlled-release potassium chloride (BBF1) and the high mixed potassium chloride with controlled-release potassium chloride (BBF2) on maize yield, potassium use efficiency, and soil available potassium were investigated in a 2-year field experiment using maize-wheat rotation system, and the none potassium (CK), the usual potassium chloride (K1) and the high potassium chloride (K2) were set up as controls. To provide the basis for application of controlled release potassium chloride, studied the synchronous nutrition relationships of between controlled-release fertilizers with maize. The results showed that: (1) The yield of maize under BBF2 treatment in 2014 and 2015 were 11 697.8 kg/hm² and 11 921.1 kg/hm², respectively. Compared with K1 treatment in the 2014 and 2015, the yield increased by 13.3% and 15.7%, respectively and the incomes increased 16.6% and 19.6%, respectively. (2) The agronomic potassium use efficiency under BBF2 treatment was greater significantly by 49.0% and 41.9% over those of the K1 treatment in 2014 and 2015, respectively. The physiological potassium use efficiency under BBF2 treatment was greater significantly by 17.6% and 34.8% over those of the K1 treatment in 2014 and 2015, respectively. The highest apparent potassium use efficiency occurred in BBF1 treatments, which were 23.73% and 35.22% in 2014 and 2015, respectively. (3) Plant height and stem diameter were significantly increased with potassium fertilizer application. Maize plant height increased

收稿日期:2017-02-20

资助项目:山东农业大学泉林黄腐酸肥料工程实验室开放研发基金项目(380285);国家自然科学基金面上项目(41571236);农业部引进国际先进农业科学技术计划“948”重点项目(2011-G30);土肥资源高效利用国家工程实验室联合研发基金项目(380123)

第一作者:张为涛(1990—),男,山东临沂人,硕士研究生,主要从事植物营养与肥料研究。E-mail:weitao53@126.com

通信作者:张民(1958—),男,山东济宁人,博士,教授,博士生导师,主要从事土壤肥料研究。E-mail:minzhang_2002@163.com

under BBF2 treatment from the later tasseling stage to the mature stage. Both CRK and BBF treatments increased significantly the leaf SPAD values of the late tasseling stage, and significantly improved the absorption of potassium and enhanced grain filling properties. The results indicate that the application of the mixed potassium chloride with controlled-release potassium chloride can meet the maize nutrition requirement of different growth period, and improved maize yield and potassium use efficiency, among which, BBF2 treatment is the optimal fertilization scheme.

Keywords: controlled-release potassium chloride fertilizer; maize; yield; potassium use efficiency; soil available potassium

玉米是我国主要粮食作物之一,对我国粮食安全具有重要意义。钾是玉米生长必需的营养元素之一,对玉米的生长和生理有着重要作用^[1-2]。研究表明,适当施用钾肥可促进叶片、茎秆干重对钾素的吸收,提高玉米的百粒重^[3]。施用钾肥还能减少籽粒中淀粉的含量,增加脂肪和蛋白质含量,改善了籽粒品质^[4]。同时,施用钾肥不仅提高了玉米的产量^[5-7],而且可提高玉米地上部干物质量^[8-9]。施用钾肥可促进钾素从营养器官向籽粒转运^[10],随施钾量的增加,钾素回收率和钾素农学利用率逐渐降低^[11]。

控释钾肥通过聚合物包膜可缓慢释放养分,可有效提高钾肥利用率^[12-13]。研究表明,施用控释包膜氯化钾能显著提高马铃薯产量、大中薯率,提高植株内的钾素累积量^[14]。控释氯化钾可替代氯化钾和硫酸钾,显著提高棉花生育期内土壤速效钾含量,增加皮棉产量和改善纤维品质^[15],提高棉花钾素利用率^[16-17]。控释钾肥可促进玉米对钾素吸收,提高玉米叶片 SPAD 值,提升光合作用,提高籽粒产量^[18]。然而速效钾肥对玉米生长影响的研究较多,控释氯化钾及其用量对玉米生长的影响鲜有报道。本试验通过大田试验,研究了不同用量的控释氯化钾、控释氯化钾与氯化钾掺混处理对玉米产量、钾肥利用率和土壤速效钾的影响,为玉米科学施用控释氯化钾提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于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中心试验站进行,于 2014 年 6 月至 2015 年 6 月连续定位试验 2 年,采用冬小麦—夏玉米轮作,一年两熟总共四季。试验小区规格为 4 m×4 m。供试土壤为棕壤,在中国土壤系统分类中为普通简育湿润淋溶土 (Typic-Hapl-Udic Argosols),质地为粉壤土 (黏粒 10.55%, 砂粒 35.35%, 粉粒 54.10%)。土壤基本性质:pH 7.32(土水比 1:2.5),有机质含量 11.7 g/kg,全氮含量 0.58 g/kg,有效磷含量 21.3 mg/kg,速效钾含量 92.1 mg/kg。

供试玉米品种为“郑单 958”。供试肥料包括氯化钾(含 K₂O 60%)、树脂包膜氯化钾(控释期 3 个

月,含 K₂O 56%),其他肥料为大颗粒尿素(含 N 46%)、磷酸二铵(含 N 18%, 含 P₂O₅ 46%)、树脂包膜尿素(控释期 3 个月,含 N 43%);硫加树脂包膜尿素(控释期 3 个月,含 N 35%)。其中控释肥均由土肥资源高效利用国家工程实验室研制生产。

1.2 试验设计

试验共设 7 个处理:(1)钾空白(CK);(2)普通氯化钾常量(K1);(3)普通氯化钾高量(K2);(4)控释氯化钾常量(CRK1);(5)控释氯化钾高量(CRK2);(6)氯化钾与控释氯化钾等比掺混常量(BBF1);(7)氯化钾与控释氯化钾等比掺混高量(BBF2)。每个处理重复 3 次,随机区组排列。各处理氮肥均由控释氮肥和速效氮肥共同提供,其中控释氮肥为树脂包膜尿素和硫加树脂包膜尿素(分别提供总氮量的 30%),剩余 40% 氮素由磷酸二铵和大颗粒尿素提供。各处理氮磷肥施用量完全一致。常量处理 N-P₂O₅-K₂O 用量按照 150-75-150 kg/hm² 施入,高量处理按照 150-75-225 kg/hm² 施入。所有肥料均作为基肥一次性沟施,埋深 10—15 cm。

玉米种 7 行,行距 60 cm,株距 21 cm,84 000 株/hm²。玉米种子埋深 3—4 cm。生育期管理措施与农民大田的常规管理措施相同,按生产上高产农田进行管理。

1.3 样品采集与分析

采用室内培养箱静水养分浸提法(25 ℃)和土壤埋袋养分释放法测定包膜钾肥钾素释放特征。控释氯化钾 25 ℃ 静水释放特征曲线,依据中华人民共和国化工行业标准《控释肥料》“HG/T 4215—2011”^[19] 中规定的方法测定。

土壤埋袋法^[20]是用塑封机将孔径为 1 mm 的尼龙网压成长 12 cm,宽 10 cm 的网袋,称取供试控释氯化钾 10.0 g,装入已制作好的网袋中,塑封机封口,于玉米播种同天埋入土壤中,深度为 15 cm。

肥料袋采集:在埋袋后第 10 天开始取样(之后每隔 10 天取样 1 次),每次各取 3 个肥料袋,带回实验室后,用水冲洗干净,于 60 ℃ 干燥箱中烘干 48 h,干燥器冷却,称重法计算控释氯化钾养分释放。

两季玉米分别于 2014 年 6 月 18 日和 2015 年 6 月 15 日播种,按玉米生育期分 5 次采样:五叶期、拔

节期、大喇叭口期、吐絮后期、成熟期,即播种后的第13(2014年7月3日,2015年6月30日),25(2014年7月15日,2015年7月12日),50(2014年8月9日,2015年8月6日),80(2014年9月8日、2015年9月5日),110(2014年10月8日和2015年10月5日)天采集土壤、植株样品,同时观测玉米的生长指标(株高、茎粗、叶片叶绿素SPAD值)。试验小区分采样区和收获区,东侧第二行作为取样区,中间3行为计产区,前4个生育期于取样区每次取3株玉米(仅取地上部分)进行生物量和钾素测定。在玉米行间随机选取3点取土壤样品,带回实验室自然风干过2 mm筛和0.25 mm筛,测定土壤样品的理化性质。收获时在收获区进行玉米茎叶生物产量和籽粒产量的实收计产。

土壤与植株样品的测定:植株叶片SPAD值采用日本Minolta公司生产的SPAD-502叶绿素仪测定;土壤速效钾含量用1 mol/L $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ 浸提,火焰光度法测定。植株样品全钾含量采用 $\text{H}_2\text{SO}_4-\text{H}_2\text{O}_2$ 联合消煮法,火焰光度计测定^[21]。

1.4 数据处理

钾肥利用效率指标的计算公式为^[16]:

(1) 钾肥农学利用率=(施钾区产量-空白区产量)/施钾量

(2) 钾肥生理利用率=(施钾区产量-空白区产量)/(施钾区钾吸收量-空白区钾积累量)

(3) 钾肥表观利用率=(施钾区钾吸收量-空白区钾吸收量)/施钾量×100%

玉米产值=玉米产量×玉米价格

肥料费用=氮肥费用+磷肥费用+钾肥费用

相关数据的处理与统计分析通过Excel 2003和SAS(8.2)统计分析软件完成分析,ANOVA方差分析及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 2003软件作图。

2 结果与分析

2.1 夏玉米控释钾肥养分释放特征

在25℃静水浸提条件下,控释氯化钾钾素释放曲线呈“S”型(图1),前40天为养分缓慢释放的迟滞期,此阶段共释放钾素15.3%;随后40~120天为养分加速释放的加速期,此阶段共释放钾素59.3%;120~170天为养分减速释放的减衰期,此阶段共释放钾素18.7%;钾素累积释放率达到80%时释放天数约为130天。

由于夏玉米季土壤平均温度接近25℃,土壤埋袋控释钾肥的钾素释放特征(图2)与25℃静水释放曲线大致相同。前30天为养分缓慢释放的迟滞期,此阶段共释放钾素13.0%和12.06%;随后30~100天为

养分加速释放的加速期,此阶段共释放钾素56.1%和51.64%,玉米处于五叶期至吐絮期生长旺盛^[9],且玉米灌浆期前对钾素一直持续吸收^[11,22],控释钾肥此阶段钾素释放量可满足玉米对钾素的需求;加速期两次钾素释放有所不同,2015季钾素释放前期释放较2014季各时段释放缓慢、释放量小,之后各时段加速快、释放量大;100~150天为养分减速释放的减衰期,此阶段共释放钾素23.81%和29.03%;两年钾素累积释放率达到80%时释放天数均约为120天。

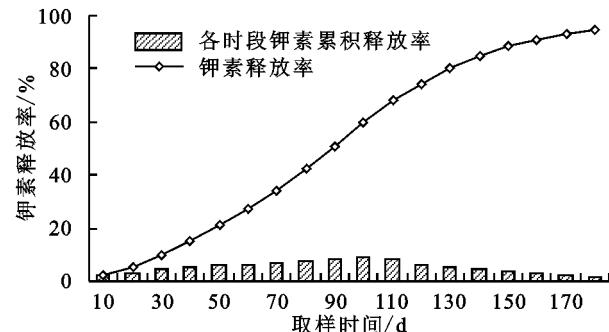


图1 控释氯化钾25℃静水中养分释放特征

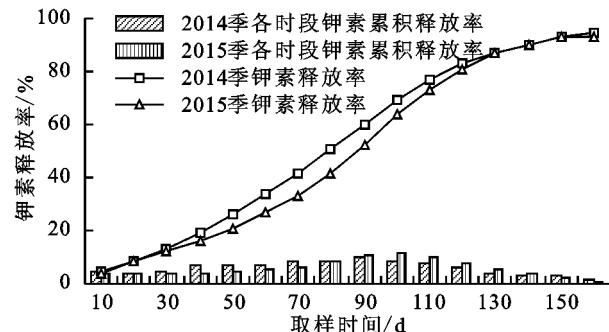


图2 控释氯化钾玉米土壤中养分释放特征

2.2 不同钾肥处理对夏玉米产量及产量构成因素的影响

不同钾肥及用量对夏玉米产量及产量构成因素存在不同程度的影响(表1)。施用钾肥较CK显著增产,且BBF2产量显著高于其他处理,BBF2产量较CK可显著增产21.1%和34.3%;钾常量水平下,CRK1、BBF1产量较K1显著提高,但CRK1、BBF1之间产量差异不显著;钾高量水平下,BBF2产量较K2分别显著提高了7.1%和15.5%,但与CRK2分别差异不显著;同类型钾肥处理下,钾高量处理的产量均高于钾常量处理,且BBF2产量较BBF1分别显著提高了8.6%和9.2%,但K1产量和K2差异不显著,CRK1产量与CRK2差异不显著。K2茎秆干物质量显著高于其他处理,这是因土壤钾素前期供应充足,使玉米茎秆快速生长,这与李文娟等^[7]的研究相符;钾常量水平下,K1茎叶干物质量较CRK1、BBF1均显著增加,且较CRK1分别增6.4%和20.1%;钾高量水平下,K2茎叶干物质量较CRK2、BBF2均显著增加,且较CRK2分别增19.0%和11.2%。同类型钾肥处理下,常量处理茎叶干物质量与高量处理无显

著差异。各处理玉米籽粒的行数无显著差异。施用钾肥较 CK 显著提高玉米籽粒的行粒数, 提高幅度为 9.5%~14.1% 和 14.5%~16.5%。施用钾肥可影

响玉米籽粒的百粒重^[5], CK 百粒重较其他施用钾肥处理显著降低; BBF2 百粒重较其他处理高 3.5%~11.7% 和 3.6%~16.5%。

表 1 不同钾肥处理的夏玉米产量和产量构成因素

年份 (年)	处理	产量/ (kg · hm ⁻²)	茎叶干物质量/ (kg · hm ⁻²)	行数	行粒数	百粒重/ g	较 K1 增产/%	较 CK 增产/%
2014	CK	9196.50d	9087.30c	14.92a	26.56b	29.64c	-10.85	0.00
	K1	10315.30c	9856.60b	14.85a	30.31a	31.70b	0.00	12.17
	K2	10523.40c	11142.40a	14.58a	29.30a	31.45b	2.02	14.43
	CRK1	10703.50b	9261.40c	14.75a	29.70a	32.00b	3.76	16.39
	CRK2	11272.10ab	9362.20c	14.88a	30.38a	31.84b	9.28	22.57
	BBF1	10772.80b	9472.50c	14.87a	29.08a	31.75b	4.44	17.14
	BBF2	11697.80a	9789.50b	14.64a	30.25a	33.12a	13.40	27.20
	CK	8878.10d	8382.30c	14.83a	31.29b	27.90d	-13.87	0.00
2015	K1	10307.70c	10793.10a	14.72a	36.50a	30.40c	0.00	16.10
	K2	10321.10c	11073.40a	14.83a	36.33a	31.33b	0.13	16.25
	CRK1	10788.60b	8983.60c	14.92a	35.83a	30.93bc	4.67	21.52
	CRK2	11224.20ab	9982.60b	14.92a	35.62a	31.36b	8.89	26.43
	BBF1	10915.80b	9813.90b	14.75a	36.38a	31.22b	5.90	22.95
	BBF2	11921.10a	9839.00b	14.92a	37.58a	32.50a	15.65	34.28

注: 同列同年数据后标有相同字母的表示在 0.05 水平上差异不显著。

2.3 不同钾肥处理对夏玉米地上部植株钾素利用率的影响

施钾可使玉米地上部植株钾素吸收量显著提高^[3], 施用钾肥处理较 CK 显著增加茎叶、籽粒的钾素吸收量, 分别最高达 35.4% 和 50.0% (表 2); 钾常量与钾高量水平下, 茎叶钾素吸收量均无明显趋势; 同类型钾肥处理下, 2014 季 K2 茎秆钾素吸收量较 K1 显著提高了 4.6%, 苗期高量的钾肥投入使玉米茎叶钾素吸收量增多; 2015 季 CRK2 茎秆钾素吸收量较 CRK1 显著提高了 7.7%, 而较氯化钾处理 (K1、K2)、氯化钾与控释钾肥等比掺混处理 (BBF1、BBF2) 差异不显著, 这可能因 2015 年控释氯化钾常量处理前期钾素释放速度较慢, 释放量较少, 影响了玉米茎叶对钾素的吸收。籽粒中的养分, 不仅来自根系的直接吸收, 还来自营养器官的养分再转移^[4], 前期大量的钾肥投入为玉米植株吸收钾素夯实基础, 促进钾素向籽粒中转移, 影响籽粒灌浆^[22], 同类型钾肥处理下, BBF2 硅粒钾素吸收量较 BBF1 两季分别显著增加了 16.7% 和 14.1%, 2014 季 CRK2 硅粒钾素吸收量较 CRK1 增加了 17.4%。施用钾肥处理钾素总吸收量较 CK 显著提高, 最高达 24.4% 和 36.6%; 同类型钾肥处理条件下, CRK2 钾素总吸收量较 CRK1 显著提高了 4.7% 和 6.7%, BBF2 钾素总吸收量较 BBF1 显著提高了 3.9% 和 8.8%, K1 钾素总吸收量与 K2 差异不显著, 这表明相对于前期钾素的高量供给, 苗期至吐絮后期钾素持续不断的输入更能促进植株对钾素的吸收。在施氯化钾处理条件下, 钾肥利用率随着施钾量的增加而降低^[11], 2014 季玉米 K2 钾肥农学、生理、表观利用率较 K1 分别显著降低

了 21.0%、12.4% 和 9.8%。BBF2 两季玉米钾肥农学利用率与 BBF1 差异不显著, BBF2 钾肥农学利用率较 K1 两季分别显著提高了 49.0% 和 41.9%, 虽然施钾量增加但 BBF2 的农学利用率未降低。K2 钾肥生理利用率较 K1 两季分别显著降低了 12.4% 和 7.9%, BBF2 钾肥生理利用率较 K1 两季分别显著提高了 17.6% 和 34.8%。2014 季 BBF1 钾肥表观利用率最高, 较 K1 和 BBF2 显著高 52.8% 和 20.5%; 2015 季 BBF1 钾肥表观利用率最高, 较 K1 和 BBF2 显著高 9.8% 和 4.3%。

2.4 不同钾肥处理对夏玉米株高、茎粗、叶片 SPAD 值的影响

从五叶期到吐絮后期, 玉米的株高逐渐提高, 其后随着玉米的成熟, 株高稍有下降(图 3, 图 4)。两季玉米拔节期前各处理株高无显著差异, 大喇叭口期各处理差异开始显现。处于吐絮后期至成熟期两季玉米, BBF2 的株高保持最高, CK 株高显著低于 CRK2、BBF1、BBF2, 与其他处理差异不显著。玉米的茎粗在整个生育期内的变化规律与株高的相同(图 5, 图 6)。两季玉米生育期内施用钾肥处理间茎粗无显著差异, CK 在成熟期的茎粗显著低于其他处理。这表明施用钾肥显著提高了玉米的株高和茎粗。玉米整个生育期内叶片叶绿素含量 SPAD 值呈现先升高后降低的趋势, 成熟期下降明显(图 7, 图 8)。CK 叶片 SPAD 值低于其他不同钾肥的处理, 特别在 2015 季表现尤为明显, 这由于土壤钾素的亏缺导致玉米早衰、叶片 SPAD 值偏低。而在玉米生育期内 BBF2 叶片 SPAD 值高于其他处理, 并在吐絮后期达到最大, 这说明钾素持续供应能防止叶片早衰, 促进

根系吸收钾素,影响植株体内养分向籽粒转运;拔节期后,钾高量处理叶片SPAD值高于同类型钾常量

处理;表明高土壤钾素的投入可以提高玉米叶片SPAD值,这与张务帅^[18]的研究相符。

表2 不同钾肥处理的夏玉米茎叶和籽粒钾素吸收量及钾肥利用率

年份 (年)	处理	茎叶钾素	籽粒钾素	钾素总	钾肥农学	钾肥生理	钾肥表观 利用率/%
		吸收量/ (kg·hm ⁻²)	吸收量/ (kg·hm ⁻²)	吸收量/ (kg·hm ⁻²)	利用率/ (kg·kg ⁻¹)	利用率/ (kg·kg ⁻¹)	
2014	CK	148.36c	31.75c	180.11c	—	—	—
	K1	163.92b	39.50b	203.42b	7.73d	41.27b	18.73c
	K2	171.48a	40.19b	211.66b	6.11c	36.17c	16.90d
	CRK1	172.41a	39.37b	211.78b	10.41ab	40.92b	25.44a
	CRK2	175.50a	46.24a	221.74a	9.56b	42.88b	22.30b
	BBF1	174.92a	40.81b	215.73b	10.89ab	38.06b	28.62a
	BBF2	176.50a	47.62a	224.12a	11.52a	48.55a	23.73b
2015	CK	138.37c	32.91d	171.28c	—	—	—
	K1	173.91ab	37.30c	211.22b	9.88b	30.79c	32.08b
	K2	177.48ab	37.75c	215.23b	6.65c	28.36d	23.44d
	CRK1	168.59b	41.35b	209.94b	13.20a	47.01a	28.08c
	CRK2	181.55a	42.25b	223.80a	10.81b	37.92b	28.49c
	BBF1	174.19ab	40.92b	215.12b	14.08a	39.97b	35.22a
	BBF2	187.31a	46.68a	233.99a	14.02a	41.51b	33.77b

注:同列同年数据后标有相同字母的表示在0.05水平上差异不显著。

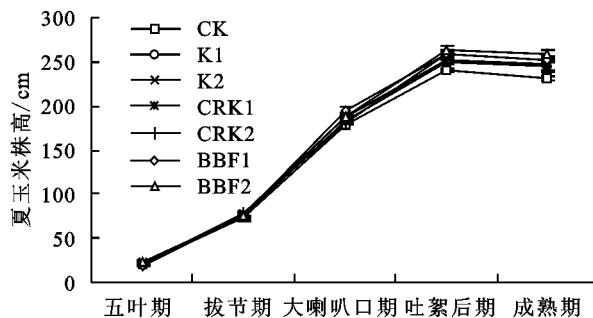


图3 不同钾肥处理2014季夏玉米株高变化

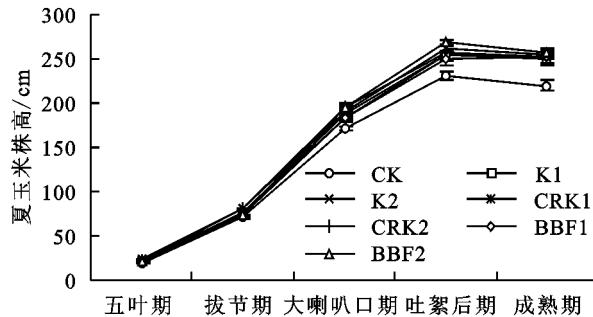


图4 不同钾肥处理2015季夏玉米株高变化

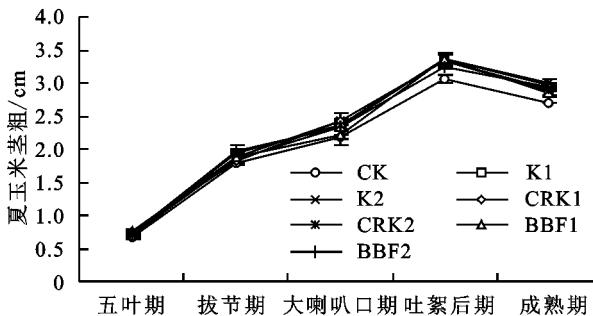


图5 不同钾肥处理2014季夏玉米茎粗变化

2.5 不同钾肥处理对夏玉米土壤速效钾的影响

施用钾肥可以显著提高土壤速效钾含量。从图9和图10可以看出,施钾肥处理的土壤速效钾含量较CK显著提高,特别是2015季表现更为明显;同类型钾肥处

理条件下,钾高量处理土壤速效钾含量较常量钾肥处理高,这与张辉^[8]、杨修一等^[15]的研究一致。玉米对钾素的需求较高,李波等^[10]指出玉米对钾素吸收主要集中于吐絮期前,施用钾肥可促进钾素从营养器官向籽粒中转运。在玉米整个生育期,CK、K1和K2土壤速效钾含量逐渐降低,五叶期为高峰值;CRK2、BBF2土壤速效钾含量先增加后减少,并在大喇叭口期出现高峰值;而CRK1、BBF1土壤速效钾含量先减少中期增加,并在大喇叭口期出现高峰值,随后逐渐下降。五叶期至拔节期,控释氯化钾处于缓慢释放期,此阶段CRK2土壤速效钾含量较K2低;而BBF2土壤速效钾含量较CRK2有所提高,这是由于BBF2中的速效氯化钾补充了控释氯化钾前期缓慢释放钾素量的不足,促进了玉米生长和茎叶对钾素的吸收。处于大喇叭口期的植株生长旺盛且对养分需求较大,控释钾肥处于钾素加速释放期,CRK1、CRK2、BBF1和BBF2土壤速效钾含量因此达到峰值,保证了土壤钾素对玉米的供应;吐絮后期至成熟期是产量形成的关键阶段,玉米从土壤中的吸钾量相对前期有所减少^[23],且控释氯化钾处于养分释放衰减时期,此时钾素大部分已释放至土壤,足以保证籽粒灌浆对钾素的需求。

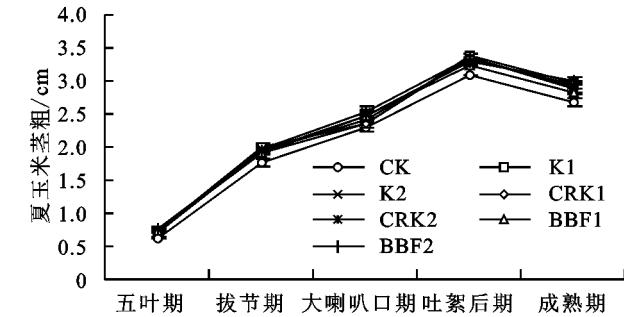


图6 不同钾肥处理2015季夏玉米茎粗变化

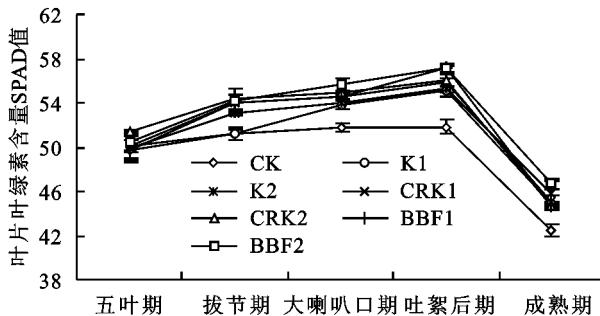


图 7 不同钾肥处理 2014 季夏玉米叶片 SPAD 值变化

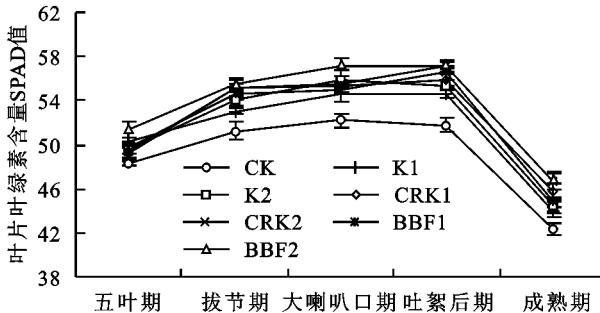


图 8 不同钾肥处理 2015 季夏玉米叶片 SPAD 值变化

2.6 不同钾肥处理的夏玉米经济效益比较

不同钾肥处理的经济效益不同(表 3)。施用钾肥较 CK 两季分别显著增产,且 BBF2 产值较 CK 显著提高 21.1% 和 34.3%;控释氯化钾处理(CRK1、CRK2)、氯化钾与控释氯化钾掺混处理(BBF1、BBF2)产值较氯化钾处理(K1、K2)两季显著提高,但 CRK1、CRK2、BBF1 三个处理产值差异不显著, BBF2 产值较 K1 两季分别显著提高了 13.3% 和 15.7%, BBF2 产值较 CRK1 两季分别显著提高了 9.3% 和 10.5%;钾常量水平下, CRK1、BBF1 产值较 K1 显著提高,但 CRK1、BBF1 之间产值差异不显著;钾高量水平下, BBF2 产值较 K2 两季分别提

高了 7.1% 和 15.5%,但与 CRK2 差异不显著;同类型钾肥处理下, K1 产值和 K2 差异不显著, CRK1 产值与 CRK2 差异不显著, BBF2 产值较 BBF1 两季分别显著提高了 8.6% 和 9.2%;各处理肥料费用差异显著, CK 最低, CRK2 最高;钾高量水平下, BBF2 肥料费用较 K2 显著高 9.6%,较 CRK2 显著低 8.0%。各处理的施肥人工费用和其他费用相同;BBF2 净收入均高于其他处理,较 K1 两季分别显著提高了 15.9% 和 19.1%;同类型钾肥处理下, 常量处理净收入较高量处理差异均不显著。这说明控释钾肥与氯化钾等比掺混高量处理较控释氯化钾高量处理可有效降低施肥成本, 提高农民收益。

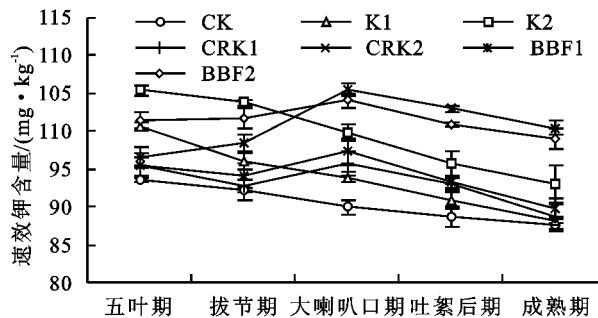


图 9 2014 季夏玉米土壤速效钾含量变化

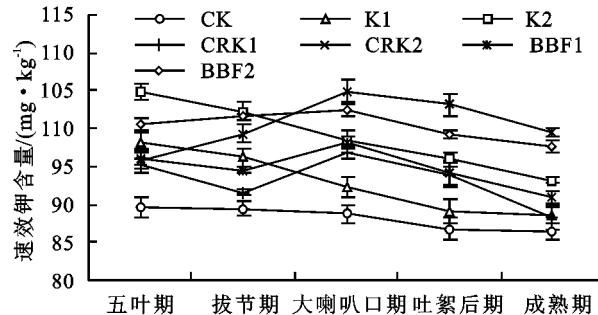


图 10 2015 季夏玉米土壤速效钾含量变化

表 3 不同钾肥处理夏玉米种植经济效益

年份 (年)	处理	经济效益/(元·hm⁻²)					比 K1 增收/%
		产值	肥料费用	施肥人工费用	其他费用	净收入	
2014	CK	19588.5d	956.5g	492.7a	4489.7a	13649.6c	-11.4
	K1	21971.6c	1591.5f	492.7a	4489.7a	15397.7bc	0.0
	K2	22414.8c	1909.0c	492.7a	4489.7a	15523.4bc	0.8
	CRK1	22798.5b	1835.1d	492.7a	4489.7a	15981.0ab	3.8
	CRK2	24009.6ab	2274.4a	492.7a	4489.7a	16752.8ab	8.8
	BBF1	22946.1b	1713.3e	492.7a	4489.7a	16250.4ab	5.5
	BBF2	24916.3a	2091.7b	492.7a	4489.7a	17842.2a	15.9
2015	CK	18910.4d	956.5g	492.7a	4489.7a	12971.4c	-15.7
	K1	21955.4c	1591.5f	492.7a	4489.7a	15381.5b	0.0
	K2	21983.9c	1909.0c	492.7a	4489.7a	15092.5b	-1.9
	CRK1	22979.7b	1835.1d	492.7a	4489.7a	16162.2b	5.1
	CRK2	23907.5ab	2274.4a	492.7a	4489.7a	16650.8ab	8.3
	BBF1	23250.7b	1713.3e	492.7a	4489.7a	16555.0ab	7.6
	BBF2	25391.9a	2091.7b	492.7a	4489.7a	18317.9a	19.1

注:树脂包膜尿素 2 370 元/吨;硫加树脂包膜尿素 1 920 元/吨;普通尿素 1 620 元/吨;磷酸二铵 3 050 元/吨;氯化钾 2 540 元/吨;控释氯化钾 3 280 元/吨;玉米价格 2 130 元/吨^[24]。其他费用包括:机器工作、灌溉、农药、种子、其他材料;同列同年数据后标有相同字母的表示在 0.05 水平上差异不显著。

3 结论

氯化钾和控释氯化钾等比掺混处理中,氯化钾为玉米前期生长提供充足的钾素,控释氯化钾钾素释放特征与玉米需钾规律吻合,满足玉米各生育期的钾素需求,显著提高了玉米吐絮后期的叶片SPAD值,促进了玉米对钾素的吸收和转运,钾素吸收量较氯化钾常量处理两季分别显著提高了10.2%和10.8%,提高了钾素农学利用率、生理利用率和表观利用率。

氯化钾和控释氯化钾等比掺混处理较氯化钾常量处理减缓了玉米前期因钾素较多而致植株的旺长,有效补偿了中后期土壤速效钾的不足,促进了籽粒的灌浆,显著提高了玉米产量,较氯化钾常量处理提高了13.4%~15.7%,提高农民收益16.1%~19.1%。本试验条件下,推荐采用氯化钾和控释氯化钾等比掺混高量处理,可提高玉米产量和钾肥利用率,增加农民收益,但控释钾肥与氯化钾最优配比及用量,还需进一步研究。

参考文献:

- [1] 常莹,闫伟平,孙宁,等.不同钾肥施用量对玉米抗倒性能及产量的影响[J].中国土壤与肥料,2014(5):47-52.
- [2] 刘淑霞,吴海燕,赵兰坡,等.不同施钾量对玉米钾素吸收利用的影响研究[J].玉米科学,2008,16(4):172-175.
- [3] 张水清,黄绍敏,聂胜委,等.长期定位施肥对夏玉米钾素吸收及土壤钾素动态变化的影响[J].植物营养与肥料学报,2014,20(1):56-63.
- [4] 何萍,金继运,李文娟,等.施钾对高油玉米和普通玉米吸钾特性及子粒产量和品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2005,11(5):620-626.
- [5] 许海涛,班新河,许波.钾肥施用对玉米干物质生产及籽粒产量影响研究[J].中国土壤与肥料,2009(3):48-50.
- [6] 张辉,张立花,黄玉芳,等.施钾对小麦/玉米产量及土壤钾素平衡的影响[J].麦类作物学报,2013,33(5):988-995.
- [7] 李文娟,何萍,金继运.钾素营养对玉米生育后期干物质和养分积累与转运的影响[J].植物营养与肥料学报,2009,15(4):799-807.
- [8] 张辉.施钾对不同供钾水平土壤小麦/玉米轮作干物质累积及养分吸收利用的影响[D].郑州:河南农业大学,2013.
- [9] 陈祥,同延安,杨倩.氮磷钾平衡施肥对夏玉米产量及养分吸收和累积的影响[J].中国土壤与肥料,2008(6):19-22.
- [10] 李波,张吉旺,靳立斌,等.施钾量对高产夏玉米产量和钾素利用的影响[J].植物营养与肥料学报,2012,18(4):832-838.
- [11] 王宜伦,谭金芳,韩燕来,等.不同施钾量对潮土夏玉米产量、钾素积累及钾肥效率的影响[J].西南农业学报,2009,22(1):110-113.
- [12] 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.
- [13] 卢艳丽,白由路,王磊,等.华北小麦-玉米轮作区缓控释肥应用效果分析[J].植物营养与肥料学报,2011,17(1):209-215.
- [14] 高翔,李成亮,张民,等.钾肥种类及用量对马铃薯生长和品质的影响[J].水土保持学报,2014,28(2):143-148.
- [15] 杨修一,耿计彪,张务帅,等.控释氮、钾肥不同用量对盆栽棉花产量及生理特性的影响[J].水土保持学报,2015,29(6):80-84.
- [16] Yang X, Geng J, Li C, 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(10):63-73.
- [17] Yang X, Geng J, Li C, et al. Cumulative release characteristics of controlled-release nitrogen and potassium fertilizers and their effects on soil fertility, and cotton growth[J]. Scientific Reports,2016,14(6):39030.
- [18] 张务帅.控释氮钾肥配比及施肥方式对玉米、小麦生长和土壤养分变化的影响[D].泰安:山东农业大学,2015.
- [19] 中华人民共和国工业和信息化部.控释肥料(HG/T4215-2011)[S].北京:化肥工业出版社,2014:1-10.
- [20] 郑文魁,李成亮,窦兴霞,等.不同包膜类型控释氮肥对小麦产量及土壤生化性质的影响[J].水土保持学报,2016,30(2):162-167.
- [21] 鲍士旦.土壤农化分析[M].第3版.北京:中国农业出版社,2005.
- [22] 李飒,彭云峰,于鹏,等.不同年代玉米品种干物质积累与钾素吸收及其分配[J].植物营养与肥料学报,2011,17(2):325-332.
- [23] 张翔,毛家伟,王守刚,等.河南主要土类玉米小麦轮作制下施用钾肥效应研究[J].中国土壤与肥料,2009(1):20-22.
- [24] Zheng W, Zhang M, Liu Z, 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(10):52-62.