

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.01.018

CSTR:32310.14.stbxb.2025.01.018

刘平安, 胡晓敏, 陈思宇, 等. 包膜氯化钾对土壤养分供应强度及玉米产量、品质的影响[J]. 水土保持学报, 2025, 39(1):

LIU Pingan, HU Xiaomin, CHEN Siyu, et al. Effects of coated potassium chloride on soil nutrient supply intensity, maize yield and quality[J].

Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(1):

## 包膜氯化钾对土壤养分供应强度及玉米产量、品质的影响

刘平安, 胡晓敏, 陈思宇, 田野, 马雨彤, 罗心雨, 庄悦卓, 张敏,  
张文睿, 冯志邦, 李泽丽, 陈琪, 刘之广, 张民

(土肥高效利用国家工程研究中心, 山东农业大学资源与环境学院, 山东 泰安 271018)

**摘要:** [目的] 控释氯化钾可实现钾离子缓慢释放与作物吸收不同步, 同时保证钾离子在土壤中的有效性, 满足作物生育后期对钾素的需求, 显著提高钾肥利用率。探究长期施用控释氯化钾及其掺混肥料对玉米产量及品质的影响, 为实现玉米高质量生产提供技术支持。[方法] 基于控释氯化钾应用于夏玉米 (*Zea mays* L., 郑单 958) 的田间长期定位试验 (始于 2014 年), 设不施钾肥 (CK)、常量普通氯化钾 (K)、常量聚氨酯包膜氯化钾 (CRK1)、减钾量 1/3 聚氨酯包膜氯化钾 (CRK2)、常量掺混氯化钾 (BBF1)、减钾量 1/3 掺混氯化钾 (BBF2) 共 6 个处理。在抽雄期进行玉米生长、土壤供钾水平、吸钾能力、光合作用等相关指标的测定, 在成熟期进行玉米品质、农学效益等相关指标测定。[结果] 1) CRK1、BBF1、CRK2 和 BBF2 较 K 处理, 产量分别提高 9.82%、12.06%、7.13%、10.68%, 地上生物量分别提高 9.22%、10.44%、4.16%、6.09%, 经济效益分别提高 16.29%、28.37%、14.15%、21.12%。2) CRK1 和 BBF1 伤流钾离子质量分数较 K 处理分别提高 19.93%、13.89%; CRK1 和 BBF2 叶绿素 SPAD 值较 K 处理分别提升 7.32%、6.59%; CRK1 叶面积指数 LAI 值较 K 提升 7.04%; CRK1 和 CRK2 净光合速率较 K 分别提升 18.58%、18.66%。3) 与 K 处理相比, CRK1、BBF1、CRK2 和 BBF2 淀粉质量分数分别提升 4.27%、2.51%、9.32%、7.16%, 油脂质量分数分别提高 5.65%、3.11%、6.63%、5.92%; CRK1 和 CRK2 粗蛋白质量分数分别提升 4.23%、1.06%。与 K 处理相比, CRK1、BBF1、CRK2 和 BBF2, 淀粉产量分别提升 14.73%、19.10%、17.56%、18.96%, 粗蛋白产量分别提升 14.47%、14.04%、8.27%、8.03%, 油脂产量分别提升 16.03%、19.67%、14.27%、17.23%。[结论] 控释氯化钾可满足玉米生长及品质形成对钾素的需求, 改善玉米的生长情况, 优化玉米籽粒的品质性状, 与普通氯化钾掺混施用后显著提高玉米产量及钾肥利用效率, 降低肥料投入成本, 并且实现减量不减产、品质不下降的目的。

**关键词:** 玉米; 控释氯化钾; 减钾; 品质; 产量; 抽雄期

**中图分类号:**

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242-(2025)01-0000-00

### Effects of Coated Potassium Chloride on Soil Nutrient Supply Intensity, Maize Yield and Quality

LIU Pingan, HU Xiaomin, CHEN Siyu, TIAN Ye, MA Yutong, LUO Xinyu, ZHUANG Yuezhao,

ZHANG Min, ZHANG Wenrui, FENG Zhibang, LI Zeli, CHEN Qi, LIU Zhiguang, ZHANG Min

(National Engineering Research Center for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, School of  
Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China)

**Abstract:** [Objective] Controlled release of potassium chloride can achieve slow release of potassium ions synchronized with crop absorption, while ensuring the effectiveness of potassium ions in the soil, meeting the demand for potassium in the later stage of crop growth, and significantly improving the utilization rate of potassium fertilizer. Exploring the effects of long-term application of controlled-release of potassium chloride and its mixed fertilizers on maize yield and quality, providing technical support for achieving high-quality

收稿日期: 2024-07-10

修回日期: 2024-09-10

录用日期: 2024-10-15

网络首发日期 (www.cnki.net):

资助项目: 国家重点研发计划课题项目 (2022YFD1700603)

第一作者: 刘平安 (2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事植物营养与肥料研究。E-mail: 19860936858@163.com

通信作者: 陈琪 (1993—) 女, 实验师, 博士, 主要从事植物营养与肥料研究。E-mail: chenqi\_2016@sdau.edu.cn

张民 (1958—) 男, 教授, 博士, 博士研究生导师, 主要从事土壤肥科学和新型肥料研发与应用。E-mail: minzhang-2002@163.com

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

maize production. [Methods] Based on the long-term field experiment of controlled release potassium chloride applied to summer maize (*Zea mays* L., Zhengdan 958) (started in 2014), six treatments were set up: no potassium fertilizer (CK), constant ordinary potassium chloride (K), constant polyurethane coated potassium chloride (CRK1), 1/3 potassium reduction polyurethane coated potassium chloride (CRK2), constant mixed potassium chloride (BBF1), and 1/3 potassium reduction mixed potassium chloride (BBF2). Relevant indicators such as maize growth, soil potassium supply level, potassium uptake capacity, photosynthesis, etc. were measured during the tasseling stage, and relevant indicators such as maize quality and agronomic benefits were determined during the maturity stage. [Results] 1) Compared with K treatment, CRK1, BBF1, CRK2, and BBF2 showed an increase in yield of 9.82%, 12.06%, 7.13%, and 10.68%, respectively. The aboveground biomass increased by 9.22%, 10.44%, 4.16%, and 6.09%, respectively, and the economic benefits increased by 16.29%, 28.37%, 14.15%, and 21.12%, respectively. 2) The potassium ion content in CRK1 and BBF1 increased by 19.93% and 13.89% respectively compared to K treatment; The chlorophyll SPAD values of CRK1 and BBF2 increased by 7.32% and 6.59% compared to K treatment; The leaf area index LAI value of CRK1 increased by 7.04% compared to K; The net photosynthetic rate of CRK1 and CRK2 increased by 18.58% and 18.66% compared to K. 3) Compared with K treatment, the starch content of CRK1, BBF1, CRK2, and BBF2 increased by 4.27%, 2.51%, 9.32%, and 7.16%, respectively, while the oil content increased by 5.65%, 3.11%, 6.63%, and 5.92%, respectively; The crude protein content of CRK1 and CRK2 increased by 4.23% and 1.06% respectively compared to K treatment. Compared with K treatment, CRK1, BBF1, CRK2, and BBF2 increased starch production by 14.73%, 19.10%, 17.56%, and 18.96%, crude protein production by 14.47%, 14.04%, 8.27%, and 8.03%, and oil production by 16.03%, 19.67%, 14.27%, and 17.23%, respectively. [Conclusion] Controlled release potassium chloride can meet the potassium requirements for maize growth and quality formation, improve maize growth, optimize maize grain quality traits, and significantly improve maize yield and potassium fertilizer utilization efficiency when mixed with ordinary potassium chloride. It also reduces fertilizer input costs and achieves the goal of reducing production and quality.

**Keywords:** maize; controlled release of potassium chloride; potassium reduction; quality; yield; tasseling stage

**Received:** 2024-07-10

**Revised:** 2024-09-10

**Accepted:** 2024-10-15

**Online**(www.cnki.net):

玉米是世界五大粮食作物之一,具有悠久的种植历史。据中国国家统计局和 Statista 提供的数据<sup>[1]</sup>显示,2023—2024 年全球共生产玉米 12.36 亿 t,消费 12.48 亿 t。其中,中国玉米播种 0.442 亿  $\text{hm}^2$ ,共生产 2.89 亿 t,消费 3.18 亿 t<sup>[2]</sup>。除食用外,玉米还用做乙醇、饲料、玉米糖浆、果糖及其他副产品制造的原料<sup>[1]</sup>,使得其在生物领域、工业生产、农业生产等各个方面表现出良好的应用前景。玉米之所以具有如此的广泛性和适应性,与玉米的高产量、高营养、易消化、易吸收和耐储存等属性密不可分<sup>[3]</sup>。因此,提高玉米品质对改善玉米营养价值、保障我国粮食安全和改善营养健康及促进农业经济发展具有重要意义。

玉米品质主要表现为商品、营养和加工品质<sup>[4]</sup>。在营养品质方面,蛋白质、淀粉、油脂为人体生长发育提供丰富的氨基酸、单糖、双糖和高额能量,其质量分数的高低对玉米食品、材料等行业有着巨大冲击。玉

米品质质量不仅受遗传基因的影响,也受环境因素和种植条件的影响。肥料养分是影响玉米品质性状的最直接因素。钾素作为三大营养元素之一,在作物整个代谢过程中具有广泛的作用,如激活植物体内多种酶的活性,提高光合作用及碳水化合物的形成与运输,促进可溶性糖、淀粉、蛋白质的形成,提高可溶性糖向甘油、脂肪酸的转化等。有研究报告<sup>[5]</sup>表明,钾对玉米光合作用和品质及光合对玉米品质<sup>[1]</sup>是通过促进作物酶活化和蛋白质合成<sup>[6]</sup>间接影响,如钾能够提高 Rubisco 及 Rubisco 活化酶活性和质量分数,降低敏感系玉米活性氧(ROS)质量分数防止叶片失绿,维持光合作用正常进行<sup>[7]</sup>。

控释氯化钾通过聚合物包覆等形式实现钾素缓慢释放,可避免过多的钾离子被土壤晶格固定,减少钾素流失,调节土壤功能微生物和代谢物的组成,促进作物根系生长发育,显著提高作物钾肥利用率和产

量。但控释氯化钾长期施用对玉米品质的影响鲜有报道。因此,本研究基于大田长期定位试验,探究不同施钾水平下的普通氯化钾、聚氨酯包膜氯化钾和普通氯化钾与聚氨酯包膜氯化钾掺混施用对玉米生长状况及其对籽粒品质的影响,为玉米高品质、高营养种植提供实践指导和理论支持。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试材料

长期定位试验于山东省泰安市山东农业大学土肥高效利用国家工程研究中心试验站(36°09'40"N, 117°09'48"E)进行。试验自 2014 年 6 月开始至今已有 10 a,采用冬小麦-夏玉米轮作制,1 a 两熟,共收获 20 季。该地区属暖温带大陆性季风气候,年平均气温 13.5 °C,年平均降雨量 750 mm。供试土壤类型为棕壤,在中国土壤系统分类中为普通简育湿润淋溶土(*Typic-Hapli-Udic Argosols*)。试验田耕层土壤基本性质为 pH 为 7.32 (水土比 2.5 : 1),有机质质量分数为 11.7 g/kg,全氮质量分数为 0.58 g/kg,有效磷质量分数为 21.3 mg/kg,速效钾质量分数为 92.1 mg/kg<sup>[8]</sup>。

供试玉米品种为“郑单 958”,生育期约 100 d,种植周期为每年 6 月上旬至 10 月上旬(图 1)。供试肥料包括氯化钾(含 K<sub>2</sub>O 60%)、聚氨酯包膜氯化钾(控释期 4 个月,含 K<sub>2</sub>O 56%)、尿素(含 N 46%)、磷酸二铵(含 N 18%,含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 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%)。控释肥(聚氨酯包膜氯化钾、树脂包膜尿素、硫加树脂包膜尿素)均由土肥高效利用国家工程研究中心研发制备。其中,聚氨酯包膜氯化钾(含 K<sub>2</sub>O 56%)以石蜡为内涂层改性肥料核心,再以蓖麻油生物基聚氨酯为外涂层作为包膜材料制备<sup>[9]</sup>。

表 1 不同处理肥料方案

处理	Table 1 Different fertilizer treatment schemes						
	N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	树脂包膜尿素	硫包膜尿素	尿素	磷酸二铵	氯化钾	包膜氯化钾
CK	150-75-0	107.13	128.56	66.56	163.06	0	0
K	150-75-225	107.13	128.56	66.56	163.06	375	0
CRK1	150-75-225	107.13	128.56	66.56	163.06	0	401.81
CRK2	150-75-150	107.13	128.56	66.56	163.06	0	267.88
BBF1	150-75-225	107.13	128.56	66.56	163.06	187.5	200.88
BBF2	150-75-150	107.13	128.56	66.56	163.06	125	133.94

### 1.3 样品采集及测定方法

采用上海博迅生产的 BSG-400 光照培养箱,按照中华人民共和国化工行业标准《控释肥料(HG/T 4215-2011)》<sup>[10]</sup>中规定的方法测定。收集抽雄期 0~20 cm 土层土壤,采用 1 mol/L CH<sub>3</sub>COONH<sub>4</sub> 浸提-火焰光度法测定土壤速效钾质量分数(水土比 10 : 1);采用热硝酸浸提-火焰光度法测定土壤缓效

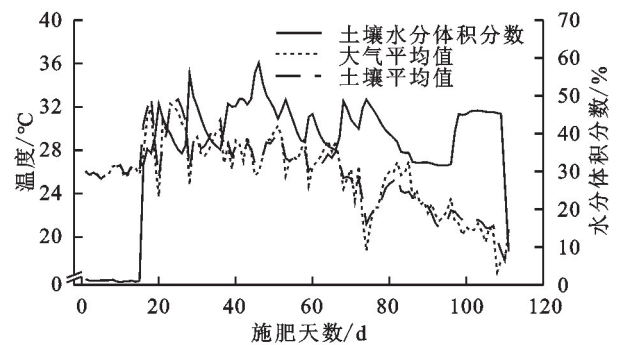


图 1 试验点田间气象数据

Fig.1 Meteorological data of the experimental site

### 1.2 试验设计

田间试验采用随机区组设计,根据农民施钾量和钾肥肥料类型,共设不施钾肥对照处理(CK)、常量普通氯化钾肥处理(K, 225 kg/hm<sup>2</sup> K<sub>2</sub>O)、常量聚氨酯包膜氯化钾肥处理(CRK1, 225 kg/hm<sup>2</sup> K<sub>2</sub>O)、减量 1/3 聚氨酯包膜氯化钾肥处理(CRK2, 150 kg/hm<sup>2</sup> K<sub>2</sub>O)、常量掺混氯化钾肥处理(BBF1, 225 kg/hm<sup>2</sup> K<sub>2</sub>O)、减量 1/3 掺混氯化钾肥处理(BBF2, 150 kg/hm<sup>2</sup> K<sub>2</sub>O)6 个处理,每个处理重复 3 次(表 1)。其中,各处理中除钾(K<sub>2</sub>O)外,氮(N 150 kg/hm<sup>2</sup>)包括 60%的控释氮肥(由 30%的硫加树脂包膜尿素和 30%的树脂包膜尿素提供)和 40%的传统肥料(由磷酸二铵和大颗粒尿素提供);磷(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 75 kg/hm<sup>2</sup>)由磷酸二铵提供。将各处理的氮、磷、钾 3 种肥料按用量物理混合均匀作为基肥施用。

试验小区面积为 16 m<sup>2</sup>(4 m×4 m)。各小区种植玉米 7 行,种子埋深 5 cm,行距 60 cm,株距 20 cm。肥料条施埋深 10~15 cm,距种子行约 10 cm,玉米种子行和肥料行数比为 1 : 1。

钾质量分数(水土比 10 : 1)。

抽雄期是影响玉米产量和品质的关键时期,此阶段玉米开始由营养生长转向生殖生长。选择少云晴朗天气,在上午 09:00~11:30,利用软尺对玉米株高(自然高度)、茎粗(地上部第 3 节)进行测定,采用冠层分析仪(LAI-2200,北京力高泰科技有限公司)进行测定叶面积指数(LAI),采用叶绿素仪(SPAD-



502,日本美能达公司)测定叶绿素 SPAD 值,并利用 Li-6 400 XT 便携式光合作用系统(Li-6 400 XT,美国 Licor 公司)测定穗位叶净光合速率。同时,在每个小区选择长势均匀的玉米 2 株,采用李波等<sup>[11]</sup>的方法收集玉米茎秆伤流液,于前 1 d 下午 18:00 从地上部第 3 节截断,采用已知重量的脱脂棉进行伤流液收集直至第 2 天下午 18:00,将收集后的脱脂棉称重并离心,利用 ICP-OES 等离子体发射光谱仪(iCAP 7 000,美国 Thermo Fisher Scientific 公司)测定其养分元素质量分数<sup>[11]</sup>。

玉米收获后,秸秆及籽粒置于烘箱 105 °C 杀青 15 min,然后转至 80 °C 烘箱烘干至恒重,其后称重磨细待测。最终按照入库水分体积分数(140.0 g/kg)折算产量<sup>[12]</sup>。采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮法<sup>[13]</sup>测定植株钾质量分数。取过 60 目塑料筛的玉米籽粒粉,采用 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-凯氏定氮法测定其粗蛋白质量分数、残余法<sup>[13]</sup>测定油脂质量分数,并在 738、629、553、423 nm 波长下采用双波长分光光度法测定淀粉质量分数。

#### 1.4 数据处理

采用 SPSS 27.0 单因素方差分析(ANOVA)比较不同处理间的显著性差异。采用 Duncan 法进行多重比较。当  $p < 0.05$  时,认为与相关系数间的差异显著。并采用 Origin 2021 软件进行作图。

钾肥利用率(%) = (施钾处理钾累积量 - 不施钾处理钾累积量) / 施钾量 × 100

淀粉产量(kg/hm<sup>2</sup>) = 产量 × 淀粉质量分数

粗蛋白质产量(kg/hm<sup>2</sup>) = 产量 × 粗蛋白质量分数

油脂产量(kg/hm<sup>2</sup>) = 产量 × 油脂质量分数

## 2 结果与分析

### 2.1 控释氯化钾养分释放特征

25 °C 静水培养,聚氨酯包膜氯化钾表现出先快后慢 2 阶段凸弧形曲线的释放特性(图 2)。第 1 阶段(0~64 d)呈快速释放趋势,累计释放 50.64%。第

2 阶段(64~134 d)呈缓慢释放趋势,累计释放 29.36%。本试验条件下,玉米种植期间土壤温度、大气温度平均分别为 26.03、25.91 °C(图 1),平均水分体积分数为 32.5%。其中,土壤和大气平均温度较恒温培养平均温度 25 °C 分别提高 1.03、0.91 °C,有利于包膜氯化钾的释放。

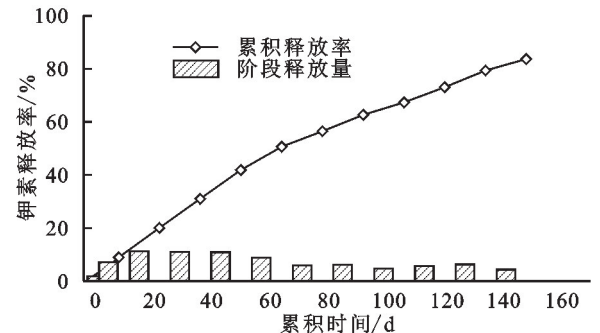


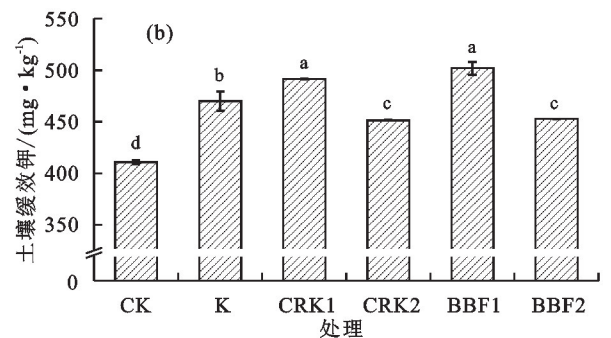
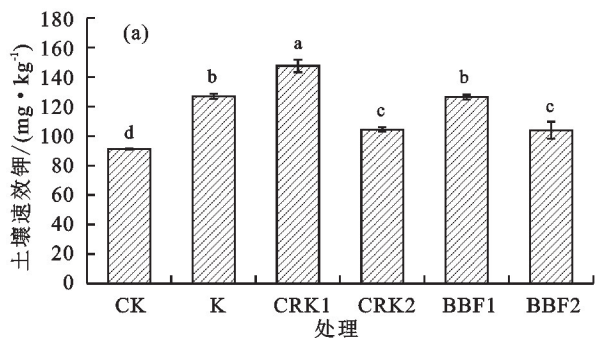
图 2 控释氯化钾 25 °C 静水养分释放特征

Fig.2 Nutrient release characteristics of controlled-release potassium chloride in still water at 25 °C

### 2.2 不同钾肥处理对土壤钾离子和伤流液营养元素的影响

单施包膜氯化钾可显著提高土壤速效钾和缓效钾质量分数(图 3)。CRK1 土壤速效钾质量分数较 K 分别显著提升 16.21%。CRK1 和 BBF1 较 CRK2 和 BBF2 分别显著提高 41.42%、21.59%。CRK1 和 BBF1 土壤缓效钾质量分数较 K 处理分别提升 4.57%、6.79%。CRK1 和 BBF1 较 CRK2 和 BBF2 分别显著提高 8.88%、10.86%。因此,包膜氯化钾可为玉米的生长提供更佳稳定和高水平的速效钾和缓效钾。

施钾可抑制玉米对 Mg 的吸收,促进对其余营养元素的吸收(表 2)。其中,单施包膜钾肥可以提高 P、Ca、Mg、Zn 和 Fe 质量分数,较 K 分别提高 3.85%~5.77%、2.63%~3.38%、1.30%~5.19%、13.76%~21.83%、4.13%~18.18%。因此,包膜氯化钾的施用可以提高作物中、后期对钾、铁、锌、锰、钙的吸收,抑制对镁的吸收。



注:图柱上方小写字母表示不同处理间差异显著( $p < 0.05$ )。下同。

图 3 玉米抽雄期 0~20 cm 土层土壤速效钾和土壤缓效钾质量分数

Fig.3 Content of available potassium and slow-release potassium in the 0~20 cm soil layer during the tasseling stage of corn

表 2 不同处理茎秆伤流液养分元素质量分数

Table 2 Nutrient element content of stem sap under different treatments

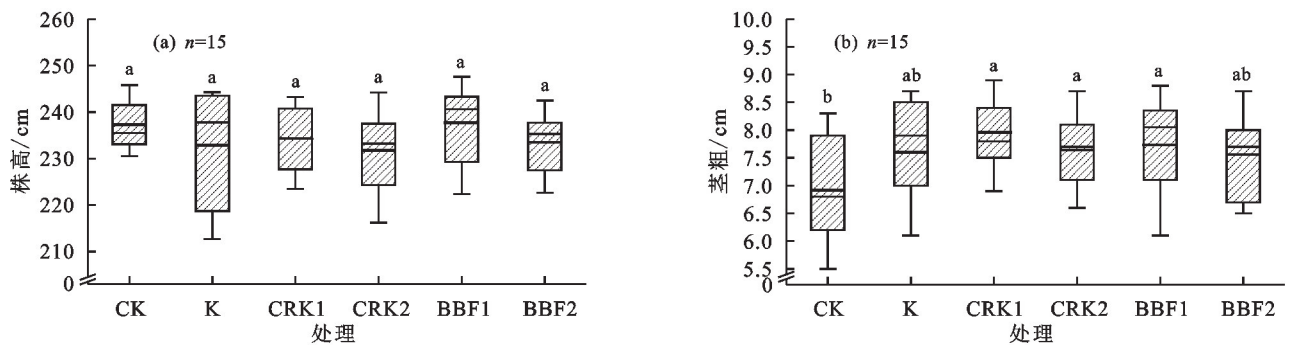
处理	Mg/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	K/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	Fe/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	Cu/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	Zn/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	Mn/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	Ca/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	P/ (mg · kg <sup>-1</sup> )
CK	1.74±0.021 3a	14.60±1.815 1c	0.006 7±0.000 8d	10.76±0.3b	9.25±0.42c	10.25±0.36c	5.13±0.02c	0.92±0.04c
K	1.54±0.040 7cd	22.36±1.291 5b	0.012 1±0.002 4b	11.67±1.29ab	13.15±1.81b	13.92±0.34a	5.33±0.03b	1.04±0.05b
CRK1	1.56±0.024 2cd	28.85±2.747 9a	0.012 6±0.001 5ab	12.42±0.53a	14.96±0.34a	13.67±0.98a	5.51±0.06a	1.08±0.01ab
CRK2	1.62±0.032 1b	21.58±0.832 9b	0.014 3±0.000 6a	11.60±0.7ab	16.02±1.14a	13.52±1.00a	5.47±0.02a	1.10±0.02a
BBF1	1.58±0.015 7c	26.38±4.555 9a	0.011 6±0.000 9b	11.55±0.16ab	12.09±0.25b	13.31±0.94ab	5.32±0.09b	1.11±0.05a
BBF2	1.53±0.024 8d	21.81±1.140 3b	0.009 3±0.000 7c	11.94±1.06ab	11.84±1.77b	12.43±0.33b	5.26±0.20bc	0.93±0.07c

注:表中数据均为平均值标准差;同列不同小写字母表示同一指标不同处理间差异显著( $p < 0.05$ )。

2.3 不同钾肥处理对夏玉米生长相关指标的影响

作物的生长指标可直观地反映作物的生长状况,比如病害、养分缺乏、疯长等问题。施钾处理中,同一水平下掺混氯化钾更有利于玉米株高的提高(图 4)。

其中,BBF1 处理的玉米株高较其他施钾处理提升 1.48%~2.57%。同一水平下,单施包膜氯化钾更有利于茎粗的增加。CRK1 处理的玉米茎粗较其他施钾处理提升 2.89%~5.25%。



注:图中的  $n=15$  代表重复次数,加黑线为平均值,细线为中位数。下同。

图 4 2023 年玉米抽雄期株高和茎粗

Fig.4 Plant height and stem thickness during the tasseling stage of maize in 2023

2.4 不同钾肥处理对夏玉米光合相关指标的影响

光合作用是自然界高等植物生长发育中不可替代的能量来源。植物通过光照将二氧化碳和水转化为有机物质,如单糖、氨基酸等,同时释放氧气。其中,叶绿素质量分数、净光合作用和叶面积指数在一定程度上可很好地反映光合作用效率<sup>[14]</sup>。施钾处理中,随着包膜氯化钾的增加,SPAD、LAI 和净光合速率提高(图 5)。CRK1 的 SPAD 值较 K 处理提升 7.32%。减量

1/3 后,BBF2 的 SPAD 较 K 显著提高 6.59%。其他处理间差异并不显著。其次,CRK1 的 LAI 较 K 显著提高 7.04%。减量 1/3 后,CRK2 较 K 和 CRK1 并不显著。另一方面,CRK1 净光合速率较 K 显著提高 18.58%。减量 1/3 后,CRK1 较 K 显著提高 18.66%。表明钾素对玉米生命周期的光合相关指标具有重要影响。在中后期,光合相关指标随着钾质量分数的升高,SPAD、LAI、净光合速率随之升高。

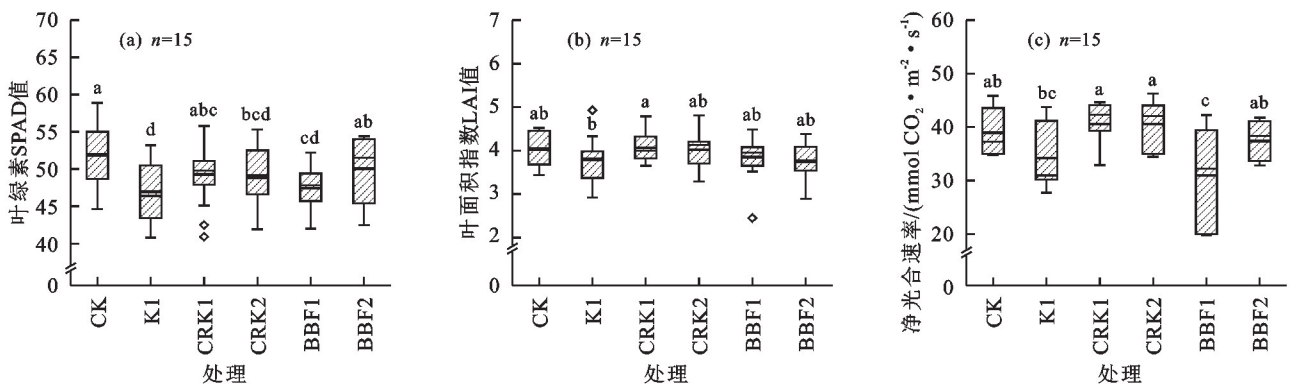


图 5 抽雄期叶绿素质量分数、叶面积指数和净光合速率

Fig.5 Chlorophyll content, leaf area index and net photosynthetic rate during the tasseling stage

2.5 不同钾肥处理对夏玉米吸钾能力相关指标的影响

伤流量和伤流液养分质量分数在一定程度上可反

映植物对养分的吸收能力。其中,伤流量指单位时间内植物从地下部运往地上部的营养液的重量<sup>[11]</sup>。伤流液

养分质量分数是伤流液中养分所占的比重。通过抽雄期玉米秸秆钾质量分数来总体反映不同钾肥处理对玉米吸钾能力的影响。施用包膜氯化钾的常量处理伤流钾离子质量分数显著提高(图 6)。CRK1 和 BBF1 伤流钾离子质量分数较 K 分别显著提高 19.93%、13.89%，较 CRK2 和 BBF2 分别显著提高 16.05%、19.03%。减量 1/3 后,CRK2 和 BBF2 较 K 并不显著。其次,减量 1/3

处理对玉米伤流量影响最优(图 6)。减量 1/3 后,CRK2 和 BBF2 伤流量较 K 分别提高 4.41%、2.43%，较 CRK1 和 BBF1 处理分别提高 6.33%、6.29%，但并不显著；另一方面,施用普通氯化钾处理秸秆钾质量分数显著增加。BBF1 秸秆钾质量分数较 K 和 BBF2 提高,但并不显著。表明常量包膜和常量掺混氯化钾处理可以显著提高伤流液钾离子质量分数和秸秆全钾累积量。

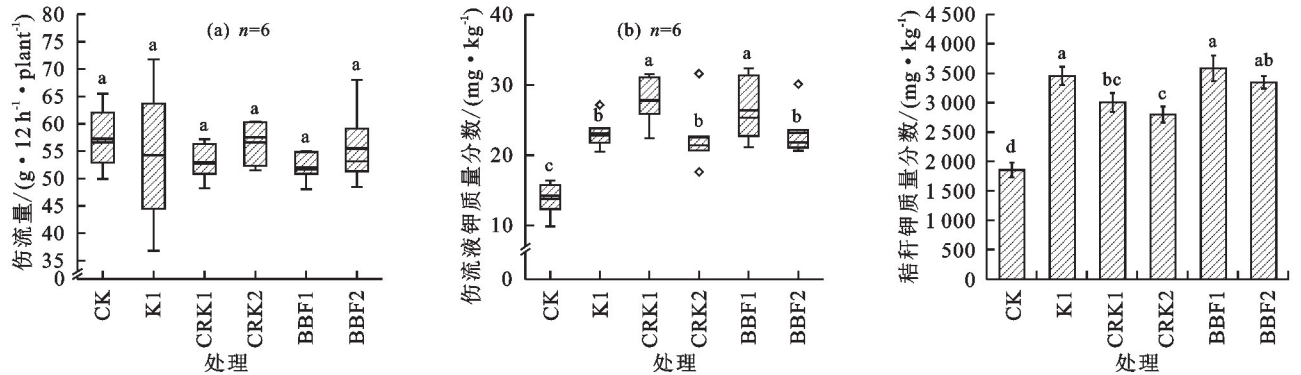


图 6 抽雄期伤流量、伤流液钾质量分数和秸秆钾质量分数

Fig.6 Injury flow during tasseling, potassium content in injury fluid and potassium content in straw

## 2.6 不同钾肥处理对夏季农学效益相关指标的影响

2023 年,其他施钾处理与 K 处理相比对玉米产量、秸秆生物量、地上生物量、秸秆全钾质量分数、籽粒全钾质量分数、钾肥利用率和经济效益均存在显著影响。掺混氯化钾处理可显著提高产量、经济效益和钾肥利用率(表 3)。CRK1 和 BBF1 产量较 K 分别显著提高 9.82%、16.06%。减量 1/3 后,CRK2 和 BBF2 较 K 分别显著提高 7.13%、10.68%。BBF1 较 BBF2 显著提高 4.86%。CRK1 和 BBF1 钾肥利用率较 K 分别显著提高 5.85%、48.69%。减量 1/3 后,CRK2 和 BBF2 较 K 分别显著提高 26.23%、62.72%。CRK2 和 BBF2 较 CRK1 和 BBF1 分别显著提高 19.25%、9.44%。CRK1 和 BBF1 经济效益较 K 分别显著提高

16.29%、28.37%。减量 1/3 后,CRK2 和 BBF2 较 K 分别显著提高 14.15%、21.12%。BBF1 较 BBF2 显著提高 5.99%。地上生物量施用包膜钾肥的常量处理地上生物量显著增加。CRK1 和 BBF1 地上生物量较 K 分别显著提高 9.22%、10.44%。减量 1/3 后,CRK2 和 BBF2 较 K 分别显著提高 4.16%、6.09%。CRK1 和 BBF1 较 CRK2 和 BBF2 分别显著提高 4.86%、4.10%。表明常量掺混氯化钾效果最佳。掺混氯化钾对秸秆钾质量分数施用效果最优。BBF1 较 CRK1 显著提高 21.87%。随着包膜钾使用量的增加,籽粒钾质量分数增加。CRK1 籽粒钾质量分数较 K 显著提高 7.36%。BBF1 与 K 并不显著。表明控释钾肥可提高玉米钾素向籽粒的转化利用。

表 3 玉米农学效益相关指标

Table 3 Relevant indicators of agronomic benefits of corn

处理	产量/ ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	秸秆生物量/ ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	地上生物量/ ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	秸秆钾/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	籽粒钾/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	钾肥利用 率/%	经济效益/ ( $\text{元} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )	增产率/ %
CK	9 587±173 e	7 341±52d	16 929±186d	9 125.03±844.28d	3 843.36b	—	13 649±448 e	-8.48
K	10 475±302d	7 593±87c	18 068±363c	12 441.95±1 509.27ab	3 851.44b	20.17±1.53d	14 943±783d	—
CRK1	11 504±197bc	8 230±1c	19 734±197a	10 941.79±270.04c	4 135.81a	21.35±0.04d	17 377±512bc	9.82
CRK2	11 222±204c	7 599±72a	18 820±275b	11 049.48±270.85bc	4 038.84ab	25.46±0.66c	17 058±529c	7.13
BBF1	12 157±263a	7 797±123c	19 954±385a	13 334.48±0ab	4 084.21ab	29.99±0.37b	19 182±680a	16.06
BBF2	11 594±1b	7 575±50b	19 169±50b	11 934.87±1 083.62abc	3 997.15ab	32.82±1.31a	18 099±1b	10.68

## 2.7 不同钾肥处理对夏玉米品质相关指标的影响

淀粉、蛋白质和油脂是生物生命活动所需材料和能源的主要供应者。其他施钾处理较 K 处理对单位重量玉米品质、单位面积玉米品质均存在显著影响(表 4)。单施包膜氯化钾对淀粉质量分数、粗蛋白和

油脂影响最优。CRK1 淀粉质量分数较 K 显著提高 4.46%。减量 1/3 后,CRK2 和 BBF2 较 K 分别显著提高 9.73%、7.48%，较 CRK1 和 BBF1 分别显著提高 5.04%、4.47%。CRK1 粗蛋白质质量分数较 K 显著提高 4.23%。减量 1/3 后,CRK2 粗蛋白质质量分



数较 K 显著提高 1.06%。CRK1 和 BBF1 油脂质量分数较 K 分别显著提高 5.65%、3.11%。减量 1/3 后,CRK2 和 BBF2 较 K 分别显著提高 6.66%、5.91%。BBF2 较 BBF1 显著提高 2.72%。表明聚氨酯包膜控释钾肥可提高玉米淀粉、粗蛋白、油脂质量分数。并且随着施钾量的增加,淀粉和油脂质量分数降低,粗蛋白质量分数提高。掺混施用氯化钾对淀粉和油脂产量效果最优(表 4)。CRK1 和 BBF1 淀粉产量较 K 分别显著提高 14.73%、19.10%,减钾 1/3 后,CRK2 和 BBF2 较 K 处理淀粉产量分别提高 17.56%、18.76%,

较 CRK1 和 BBF1 不显著。CRK1 和 BBF1 油脂产量较 K 处理分别显著提高 16.03%、19.67%。减量 1/3 后,CRK2 和 BBF2 较 K 分别显著提高 14.27%、17.23%,较 CRK1 和 BBF1 不显著。施用包膜氯化钾常量处理显著提高蛋白产量。CRK1 和 BBF1 蛋白产量较 K 分别显著提高 14.47%、14.04%,较 CRK2 和 BBF2 分别显著提高 5.73%、5.56%。减量 1/3 后,CRK2 和 BBF2 较 K 分别显著提高 8.27%、8.03%。表明品质产量受掺混氯化钾的影响最大,并随着施钾量增加而增加。

表 4 玉米品质指标

Table 4 Corn quality indicators

处理	直链淀粉质量分数/ (g·kg <sup>-1</sup> )	支链淀粉质量分数/ (g·kg <sup>-1</sup> )	淀粉质量分数/ (g·kg <sup>-1</sup> )	粗蛋白质量分数/ (g·kg <sup>-1</sup> )	油脂质量分数/ (g·kg <sup>-1</sup> )	淀粉产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	粗蛋白产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	油脂产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )
CK	175.64±0d	523.21±44.20c	735.34±10.25d	73.39±0.25e	40.84±0.46c	7 049.70±102.82c	703.59±11.66d	391.53±5.43d
K	187.08±2.42cd	553.39±9.77bc	738.06±6.83cd	79.82±0.04c	41.42±0.74c	7 731.18±265.53b	836.11±24.15c	433.87±20.49c
CRK1	192.19±7.73bc	602.91±14.88a	771.01±8.73b	83.20±0.27a	43.76±0.14a	8 869.70±203.07a	957.13±17.24a	503.42±9.38ab
CRK2	205.37±7.74a	597.18±1.67a	809.90±17.30a	80.67±0.63b	44.18±0.32a	9 088.70±297.85a	905.28±16.11b	495.79±5.67b
BBF1	191.58±9.03c	584.49±1.35ab	757.40±12.83bc	78.43±0.23d	42.71±0.18b	9 207.71±79.34a	953.47±18.84a	519.23±10.74a
BBF2	203.45±6.89ab	570.58±1.13ab	793.28±16.91a	77.91±0.74d	43.87±0.91a	9 197.29±196.33a	903.29±8.86b	508.63±10.43ab

### 3 讨论

#### 3.1 不同处理对土壤养分供应的影响

控释氯化钾的释放速率受温度和水分影响。温度作为影响聚氨酯包膜氯化钾肥释放周期变化的主要原因<sup>[15]</sup>,可提高钾的活性和溶解度;水分进入膜内后溶解养分,肥料颗粒开始膨胀,导致膜壳内部的交联网络在压力的作用下产生一定的“孔隙”,从而加快肥料的释放,缩短肥料释放周期<sup>[12,16]</sup>。因此,在玉米季土壤平均温度为 26.03 °C 条件下(图 1),释放周期被缩短,更好地符合“郑单 958”生长周期,满足玉米对钾素的吸收<sup>[12,17]</sup>。

土壤速效钾和缓效钾质量分数随施钾量增加而增加<sup>[12]</sup>,并与包膜氯化钾和普通氯化钾占比有关。其中,高包膜钾占比有利于土壤速效钾的提升,较其他施钾处理提高 16.22%~41.42%。可能是因为包膜氯化钾的生物基疏水外层<sup>[9,18]</sup>致使钾的释放期延长至玉米生育后期。在疏水外膜的作用下,水分子进入膜壳溶解晶体钾离子后与膜外水形成离子内外渗透压,驱动钾离子的释放,通过膜壳时受流量限制,从而达到延长钾肥释放周期的效果。而土壤缓效钾的提升对土壤速效钾质量分数的稳定性要求较高,所以,在高施钾量 BBF 处理较优的水溶性和控释性条件下,土壤缓效钾质量分数最高,比其他施钾处理提高 2.22%~10.86%。

施钾量增加促进作物对钾的吸收,同时减少对钙和镁的吸收<sup>[19]</sup>。本研究发现,土壤钾素水平与钙、镁质量分数间没有一致的关系。因此,此结果不支持随着

植物对 K 的吸收增加而对钙和镁吸收的抑制。其次,本研究发现,施钾可抑制玉米对 Mg 的吸收,促进对其余营养元素的吸收。其中,单施包膜钾肥可提高 P、Ca、Mg、Zn 和 Fe 质量分数,较 K 分别提高 3.85%~5.77%、2.63%~3.38%、1.30%~5.19%、13.76%~21.83%、4.13%~18.18%。可能是因为包膜氯化钾减缓钾的释放,为玉米的全生育周期持续供应钾肥,从而保障玉米的肥料需求。因此,包膜氯化钾的施用可提高作物对钾、铁、锌、锰、钙的吸收,抑制对镁的吸收。

#### 3.2 不同处理对玉米光合相关指标的影响

抽雄期的中层穗位叶是玉米净光合速率较强的部位。测定穗位叶的 SPAD 可反映植物的光合作用能力和生长<sup>[20]</sup>。钾可影响 SPAD 的合成和冠层结构的形态。施钾肥能促进玉米拔节期后叶片的生长,提高玉米整个生育期的 SPAD,促进光合作用,提高作物产量。在常量施钾处理中,随着包膜氯化钾占比的增加,SPAD 和 LAI 分别增加 0.99%~5.00%、1.67%~7.30%。可能是因为包膜钾肥的控释作用,使得钾肥释放周期延伸到中后期,为玉米提供充足钾素,加快叶绿素合成,改善叶绿体结构和冠层结构造成的。与施钾条件下净光合速率随包膜钾占比增加而增加的规律相符。因此,SPAD 和 LAI 可直接反映玉米净光合能力和生长。

其次,在包膜氯化钾条件下,净光合速率提高 4.03%~4.10%。可能是在玉米中后期,持续缓慢释放的钾素加快光合酶活性和代谢过程造成的。Rubisco 酶作为光合作用碳固定途径(卡尔文循环)中重要限速酶,受细胞钾离子浓度的影响。木酮糖-1,

5-二磷酸(*XuBP*)是 Rubisco 的抑制剂,在 pH 低于 8.0 的情况下合成,并在 pH 为 7.5 时与 Rubisco 脱氨基位点紧密结合,导致 Rubisco 失活<sup>[21]</sup>。在此过程中,pH 与钾质量分数变化具有一致性,当叶片 K 浓度低于 1.4%~1.5%时,胞质 pH 开始降低<sup>[22]</sup>。其次,CO<sub>2</sub>作为光合作用的原料之一,其浓度的变化直接影响着暗反应的进行。在光合过程中,钾可通过改变保卫细胞的渗透压,调节气孔形态和功能影响气孔导度,促进叶片对 CO<sub>2</sub>的吸收和同化。并且钾还可加快可溶性糖等光合产物的转运<sup>[23]</sup>,增加细胞导度,促进 CO<sub>2</sub>向叶绿体的运输,从而促进光合作用。此现象表明中、后期钾对光合酶活性和玉米光合相关指标依旧具有重要影响。

因此,包膜钾肥可为玉米光合作用后期提供充足的钾素,与速效钾肥掺混后与玉米整个生育期对钾素的需求规律更贴合,进而促进玉米前、中、后期的光合酶活性,并加快代谢活性,从而促进光合作用的进行。

### 3.3 不同施钾处理对玉米品质和农学效益的影响

玉米品质受遗传基因、环境因素、种植条件的影响,其中肥料养分对玉米品质的影响最为直接。试验结果表明,与普通氯化钾处理相比,施用包膜氯化钾,玉米籽粒淀粉质量分数显著提高 2.62%~9.73%。可能是与在淀粉合成过程中,钾素的稳定持续供应提高/抑制关键酶活性,加快代谢过程造成的。如钾可通过提高/抑制 Rubisco 酶、PEPC 羧化酶、蔗糖磷酸合成酶(SPS)、蔗糖合成酶(SS)、酸性转化酶(AI)和中性转化酶(NI)活性,来促进有机碳合成和蔗糖的合成<sup>[24]</sup>,减少蔗糖的降解。其次,钾还可通过提高淀粉“库-源”转运效率,从而加快蔗糖、淀粉的合成与积累量。此外,油脂的合成材料甘油和脂肪酸是由糖转化而来,受淀粉质量分数显著影响,其合成过程主要受钾对糖代谢途径的影响。

除淀粉和油脂外,钾素也可影响粗蛋白质的质量分数。施钾处理粗蛋白质质量分数高于不施钾处理,提高 6.16%~13.37%(表 4)。或许是在蛋白质合成过程中玉米对钾的吸收积累(图 6),提高核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶/加氧酶(*Rubisco*)、谷氨酰胺合成酶(GS)、蛋白酶、肽酶、RNA 聚合酶活性,优化蛋白质合成的碳同化,促进氨基酸合成,加快蛋白质降解和回收,促进 rRNA 基因转录造成的。其次,钾还可通过调节硝酸盐的吸收和运输<sup>[25]</sup>,为蛋白质合成提供氨基酸。

基于长期定位试验,2023 年的玉米产量、经济效益、钾肥利用率与 2014—2018 年趋势相同<sup>[12]</sup>。掺混处理产量高于包膜处理,并随着施钾量的增加而增加,其较 K 处理,分别提高 16.06%和 10.68%,与掺混钾肥具有很好的水溶性和控释性有关。一方面,普通氯化钾可为玉米苗期和中期提供丰富的钾素,弥补

包膜氯化钾前期释放缓慢的缺点,为玉米养分吸收提供更多的时间,有效提高吸收/损失比值;另一方面,包膜氯化钾的调控作用降低单位时间土壤中氯离子质量分数,减小其对玉米的毒害作用,有利于玉米的生长,其缓慢释放的特性满足玉米中后期及籽粒品质性状形成对钾素的需求。此外,试验<sup>[12]</sup>发现,高钾肥利用率(KUE)出现在掺混条件下,并随着钾肥施用量呈负相关。可能是因为玉米对钾素的吸收具有一定范围,过多的钾肥投入使得吸收/损失值降低,造成钾肥的浪费。其次,与普通氯化钾相比,尽管包膜氯化钾单价提高 450 元/t,但由于其产量优势仍比普通氯化钾处理经济效益提高 14.15%~28.37%,且较硫酸钾价格依旧保持低价优势,使得包膜氯化钾被广泛推广成为可能。因此,本试验条件下,综合玉米品质性状普通氯化钾与控释氯化钾掺混处理为华北平原地区推荐的施钾模式。

## 4 结论

控释氯化钾在满足玉米生长及品质形成对钾素的需求的同时,改善玉米的生长情况,优化玉米籽粒的品质性状,与普通氯化钾掺混施用后显著提高玉米产量及钾肥利用效率、降低肥料投入成本,并且实现减量不减产、品质不下降的目的。其中,K<sub>2</sub>O 每 hm<sup>2</sup>施用 225 kg,控释氯化钾与普通氯化钾按 1:1 掺混时效果最佳。

### 参考文献:

- [1] Shahbandeh M. Global corn consumption 2022/2023, by county[R].Germany:Statista,2023.
- [2] 国家统计局.2023 年全国粮食生产再获丰收;国家统计局农村司司长王贵荣解读粮食生产情况[M].北京:国家统计局,2023.  
National Bureau of Statistics. In 2023, the national grain production will achieve another bumper harvest Wang Guirong, director of the rural department of the National Bureau of Statistics, interprets the situation of grain production[M].Beijing: National Bureau of Statistics,2023.
- [3] 李景玉,孙萍萍,李达,等.全株玉米青贮饲料品质与饲用价值研究[J].农业与技术,2024,44(6):97-101.  
LI J Y, SUN P P, LI D, et al. Study on quality and feeding value of whole-plant corn silage[J]. Agriculture and Technology,2024,44(6):97-101.
- [4] 贾士芳,董树亭,王空军,等.玉米花期不同阶段遮光对籽粒品质的影响[J].作物学报,2007,33(12):1960-1967.  
JIA S F, DONG S T, WANG K J, et al. Effect of shading on grain quality at different stages from flowering to maturity in maize[J].Acta Agronomica Sinica,2007,33(12):1960-1967.
- [5] 王远东.钾肥对玉米品质和产量的影响[J].上海农业科技,2012(3):127-128.  
WANG Y D. Effect of potassium fertilizer on quality



- and yield of maize[J]. *Shanghai Agricultural Science and Technology*, 2012(3):127-128.
- [6] XU X X, DU X, WANG F, et al. Effects of potassium levels on plant growth, accumulation and distribution of carbon, and nitrate metabolism in apple dwarf rootstock seedlings[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 11:e904.
- [7] SHAFIQ B A, NAWAZ F, MAJEED S, et al. Sulfate-based fertilizers regulate nutrient uptake, photosynthetic gas exchange, and enzymatic antioxidants to increase sunflower growth and yield under drought stress[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2021, 21(3): 2229-2241.
- [8] 张为涛,刘之广,张民,等.控释钾肥对玉米产量、钾肥利用率和土壤速效钾的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(4):241-247.
- ZHANG W T, LIU Z G, ZHANG M, et al. Effects of controlled-release potassium fertilizers on the yield of maize, potassium use efficiency and soil available potassium[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(4):241-247.
- [9] LU H, TIAN H Y, LIU Z G, et al. Polyolefin wax modification improved characteristics of nutrient release from biopolymer-coated phosphorus fertilizers[J]. *Acs Omega*, 2019, 4(23):20402-20409.
- [10] 中华人民共和国工业和信息化部.控释肥料:HG/T 4215—2011[S].北京:化工出版社,2014.
- Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Controlled release fertilizer (HG/T 4215—2011) [S]. Beijing: Fertilizer Industry Press, 2014.
- [11] 李波,张吉旺,靳立斌,等.基于 ICP-AES 技术施钾量对高产夏玉米伤流液特性的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(3):209-212.
- LI B, ZHANG J W, JIN L B, et al. Effects of K fertilization on characteristic of bleeding sap in summer maize under high yield conditions by ICP-AES technology[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(3):209-212.
- [12] LI Z L, LIU Z G, ZHANG M, et al. Long-term effects of controlled-release potassium chloride on soil available potassium, nutrient absorption and yield of maize plants[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 196:e104438.
- [13] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社, 2000.
- BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [14] 刘战东,张凯,黄超,等.不同耕作和灌溉方式对玉米光合特性的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(4):213-220.
- LIU Z D, ZHANG K, HUANG C, et al. Effects of different tillage and irrigation methods on photosynthetic characteristics of maize[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(4):213-220.
- [15] KETABCHI M R, MASOUDI SOLTANI S, CHAN A. Synthesis of a new biocomposite for fertiliser coating: assessment of biodegradability and thermal stability[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(41):93722-93730.
- [16] 成静,唐雨昂,朱星宇,等.包膜型功能缓控释肥及其膜材料研究进展[J/OL]. *精细化工*, 2024:1-10. *Fine Chemicals*, 2024: 1-10. <http://doi.org/10.13550j.jxhg.20240018>.
- CHENG J, TANG Y A, ZHU X Y, et al. Research progress on encapsulated functional slow-release fertilizers and their membrane materials[J/OL]. *Fine Chemicals*, 2024: 1-10. <http://doi.org/10.13550j.jxhg.20240018>.
- [17] FIRMANDA A, FAHMA F, SYAMSU K, et al. Biopolymer-based slow/controlled-release fertilizer (SRF/CRF): Nutrient release mechanism and agricultural sustainability[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12(2):e112177.
- [18] TIAN H Y, LIU Z G, ZHANG M, et al. Biobased polyurethane, epoxy resin, and polyolefin wax composite coating for controlled-release fertilizer[J]. *Acs Applied Materials and Interfaces*, 2019, 11(5):5380-5392.
- [19] MINEO H, OHMI S, ISHIDA K, et al. Ingestion of potato starch containing high levels of esterified phosphorus reduces calcium and magnesium absorption and their femoral retention in rats[J]. *Nutrition Research*, 2009, 29(9):648-655.
- [20] LIU T N, CHEN J Z, WANG Z Y, et al. Ridge and furrow planting pattern optimizes canopy structure of summer maize and obtains higher grain yield[J]. *Field Crops Research*, 2018, 219:242-249.
- [21] ORR D J, ROBIJNS A K J, BAKER C R, et al. Dynamics of Rubisco regulation by sugar phosphate derivatives and their phosphatases[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2023, 74(2):581-590.
- [22] HU W S, GU H H, WANG K G, et al. Potassium deficiency stress reduces Rubisco activity in Brassica napus leaves by subcellular acidification decreasing photosynthetic rate[J]. *Plant Physiology and Biochemistry: Ppb*, 2023, 201:e107912.
- [23] ZHAO D L, OOSTERHUIS D M, BEDNARZ C W. Influence of potassium deficiency on photosynthesis, chlorophyll content, and chloroplast ultrastructure of cotton plants[J]. *Photosynthetica*, 2001, 39(1):103-109.
- [24] ALI S, HAFEEZ A, MA X L, et al. Potassium relative ratio to nitrogen considerably favors carbon metabolism in late-planted cotton at high planting density[J]. *Field Crops Research*, 2018, 223:48-56.
- [25] XU X X, ZHANG X L, LIU C L, et al. Appropriate increasing potassium supply alleviates the inhibition of high nitrogen on root growth by regulating antioxidant system, hormone balance, carbon assimilation and transportation in apple[J]. *Scientia Horticulturae*, 2023, 311:e111828.