

川中丘陵春玉米适宜钾肥用量研究

谭杰^{1,2}, 孔凡磊^{1,2}, 曾晖³, 袁继超^{1,2*}

(1 四川农业大学农学院, 四川温江 611130; 2 农业部西南作物生理生态与耕作重点实验室, 四川温江 611130;

3 简阳市农业局, 四川简阳 641400)

摘要:【目的】采用两年田间定位试验, 探讨施钾量对川中丘陵春玉米产量、钾素吸收和利用特性的影响规律, 以期川中丘陵高产春玉米的钾肥管理提供科学依据。【方法】以正红 505 为试验材料, 在施 N 225 kg/hm²、P₂O₅ 90 kg/hm² 的基础上, 设置 5 个施钾量 (K₂O) 处理, 分别为 0、45、90、135、180 kg/hm², 每个处理 3 次重复, 完全随机区组设计。在玉米大喇叭口期、吐丝期、灌浆期 (吐丝后 21 天) 和成熟期采集植株样品, 测定干物质积累量和器官含钾量, 并计算植株钾积累量、钾素利用和转运, 在玉米成熟期测定玉米产量。【结果】随施钾量的增加春玉米产量、钾素农学利用率先升高后逐渐降低, 钾生理效率、钾素利用效率和钾素当季回收率随施钾量的增加呈降低趋势, 钾素吸收效率、钾肥偏生产力随施钾量的增加显著降低, 增施钾肥对钾素收获指数影响不显著。通过二次曲线模拟, 在施钾量为 K₂O 96.1 kg/hm² 时玉米产量最高, 达到最高产量时, 每生产 100 kg 玉米籽粒需吸收 K₂O 1.55 kg。玉米植株对钾素的吸收主要在吐丝之前, 其吸收量占全生育期总量的 72.7%~88.9%, 灌浆初期也仍有较大量的吸收积累; 籽粒中的钾素大部分来源于营养器官的转移, 施用钾肥促进了钾素向籽粒的转运。【结论】本试验条件下, 川中丘陵春玉米施 K₂O 为 90 kg/hm² 左右时, 可获得较高钾肥利用率, 并获得高产。

关键词: 川中丘陵; 春玉米; 施钾量; 产量; 钾素利用效率

中图分类号: S513.062

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2016)03-0838-09

The suitable potassium fertilizer rate in spring maize in hilly area of central Sichuan Basin, China

TAN Jie^{1,2}, KONG Fan-lei^{1,2}, ZENG Hui³, YUAN Ji-chao^{1,2*}

(1 College of Agronomy, Sichuan Agricultural University, Wenjiang 611130, China;

2 Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Farming System in Southwest China, Ministry of Agriculture of China,

Wenjiang 611130, China; 3 Jianyang Municipal Bureau of Agriculture, Jianyang, Sichuan 641400, China)

Abstract: 【Objectives】A field experiment was conducted for two consecutive years (2013 and 2014) to study the suitable potassium application rate for high grain yield and potassium (K) use efficiency, to provide a scientific basis for K management in spring maize production in the hilly area of central Sichuan Basin, China. 【Methods】A spring maize cultivar Zhenghong 505 was used, and a randomized complete block experiment was conducted with five K₂O application rates of 0, 45, 90, 135 and 180 kg/hm², in the base of application of N 225 kg/hm² and P₂O₅ 90 kg/hm², respectively. Plant samples were collected in big trumpet period, silking stage, filling stage, mature stage for the determination of plant dry weight and K contents. The plant K accumulation, K translocation and use efficiency were calculated. 【Results】As applied K increasing from 0 to 180 kg/hm², the grain yield and the agronomic efficiency of K increased first, then gradually decreased; the K physiological efficiency and K recovery efficiency decreased. The K uptake efficiency, K fertilizer efficiency and partial factor productivity reduced significantly except K harvest index. According to the simulated results, the maximum grain yield of maize would be obtained in K₂O application rate of 96.1 kg/hm². For production of 100-kilogram grain, it needs to absorb K₂O of 1.55 kg. K was mainly absorbed before silking stage, the percentage was 72.7% - 88.9% of total

收稿日期: 2014-10-13 接受日期: 2015-03-12

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAD04B13-2)资助。

作者简介: 谭杰(1990—), 男, 重庆万州人, 硕士研究生, 主要从事作物高产优质高效栽培理论与技术研究。E-mail: tanjie8986@163.com

* 通信作者 E-mail: yuanjichao5@163.com

K uptake, in early filling stage there was still a relatively high absorption and accumulation. Most K in grains came from transfer from nutritive organ, and higher application of potassium fertilizer resulted in higher potassium transfer to grains. **[Conclusions]** Under the experimental condition, the optimal K fertilizer rate was K_2O 90 kg/hm² for high yield and high K use efficiency.

Key words: hilly area of central Sichuan Basin; spring maize; K application rate; grain yield; K use efficiency

钾是玉米生长发育必需的大量营养元素之一,与氮、磷等元素最大的不同在于钾不参与植物体内的组织构成,但对酶的激活、蛋白质合成、物质运输、渗透调节及抗逆等生理过程都有重要影响^[1],具有重要的生物物理和生物化学功能^[2]。土壤中钾素含量一般为 1%~3%,虽然显著高于氮和磷,但绝大部分不能被当季植物吸收利用,植物可吸收的有效钾含量一般不超过全钾量的 2%^[3-4]。随着主要农作物高产品种的应用和多年来集约化种植使复种指数不断提高,土壤供钾量显著降低,全国大约 1/4~1/3 的耕地缺钾或严重缺钾^[5],加上长期以来生产中重施氮肥和磷肥、少施或不施钾肥,玉米栽种区缺钾面积不断扩大;另一方面,生产中又存在着钾肥施用不平衡,肥料利用率较低的现象,引起钾肥资源的浪费^[6]。因此提高钾肥的吸收利用效率是缓解资源短缺、节约资源的重要途径^[7]。因而,进行钾肥适宜用量研究,对实现玉米优质高效生产具有重要意义。

有关施钾对玉米产量,钾素积累、运转及钾肥利用率的影响虽有较多研究^[8-14],但绝大多数集中在北方地区,未见西南地区尤其是川中丘陵的相关报道。春玉米是川中丘陵主要的种植作物,近些年来由于品种改良和栽培技术改进,产量虽有所提高,但该地区玉米施肥整体仍呈高氮低钾的现状^[15],限制了玉米产量的进一步提高。本研究通过设置不同的施钾水平试验,研究了施钾量对川中丘陵春玉米产量及钾素吸收利用效率的影响,以为川中丘陵高产春玉米的钾肥管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2013 年和 2014 年在简阳市芦葭镇英明村进行。土壤类型为紫色土,0—20 cm 土层两年的土壤基础肥力状况分别为:有机质 9.87 g/kg、10.12 g/kg,全氮 1.05 g/kg、0.97 g/kg,碱解氮 63.14 mg/kg、67.42 mg/kg,速效磷 9.13 mg/kg、14.23 mg/kg,速效钾 50.37 mg/kg、55.46 mg/kg,pH 值 7.92、7.56,氮、磷属于中等水平,钾属于较

低水平;生长期两年内的气候条件分别为:降水量 649.80 mm、612.47 mm,平均气温 23.64 °C、24.16 °C,日照时数 487.00 h、523.43 h。

试验以四川省农业厅推荐的主导品种正红 505 为材料,设施钾量(K_2O)为 0、45、90、135、180 kg/hm² 5 个水平,分别用 K0、K45、K90、K135、K180 表示,所用钾肥为氯化钾(含 K_2O 60%),每个处理氮、磷用量相同,施 N 225 kg/hm²、 P_2O_5 90 kg/hm²,磷肥在播种前全部施入,氮肥和钾肥分别在播种和大喇叭口期按 1:1 的比例在窄行中开沟施入。种植密度为 50000 plant/hm²,1.5 m + 0.5 m 宽窄行种植,小区面积 24 m²,3 次重复,随机区组排列。2013 年 4 月 3 日和 2014 年 4 月 1 日足墒播种,全生育期无灌溉,生育期内田间管理按当地生产习惯进行,及时防治病虫害、草害,8 月 2 日和 7 月 29 日收获。

1.2 测定项目和方法

每小区分别于大喇叭口期、吐丝期、灌浆期(吐丝后 21 天)和成熟期在取样区采集长势均匀一致的地上部整株,每次每个小区均重复取样 8 株,于 105 °C 杀青 30 min,80 °C 烘干至恒重,称重后用粉碎机粉碎混匀后密封保存待测。植株全钾含量用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮,火焰光度计法测定。

基础土壤样品经自然风干后,分别过 20 目和 60 目筛,充分混匀后待测。有机质用重铬酸钾氧化—外加热法;土壤全氮用开氏法;碱解氮用碱解扩散法;速效磷用 0.5 mol/L $NaHCO_3$ 浸提,钼蓝比色法;速效钾采用 1 mol/L NH_4OAc 浸提—火焰光度计法测定^[16]。

成熟时每小区选取生长一致的 20 个果穗进行考种,考察穗行数、行粒数、千粒重,其余果穗实收计产。

1.3 相关参数计算^[17-19]

植株钾素积累量(KAA, kg/hm²) = 单株干重(kg/plant) × 种植密度(plant/hm²) × 单株含钾量(%);

钾生理效率(KPE, kg/kg) = 生物量(kg/hm²) / 植株钾素积累量(kg/hm²);

钾素利用效率 (KUTE, kg/kg) = 经济产量 (kg/hm²)/植株钾素积累量 (kg/hm²);

钾收获指数 (KHI, %) = 籽粒中钾积累量 (kg/hm²)/植株钾素积累量 (kg/hm²) × 100;

钾素吸收效率 (KUPE, kg/kg) = 植株钾素积累量 (kg/hm²)/施钾量 (kg/hm²);

钾肥农学利用率 (KAE, kg/kg) = [施钾区籽粒产量 (kg/hm²) - 不施钾区籽粒产量 (kg/hm²)]/施钾量 (kg/hm²);

钾肥当季回收率 (KRE, %) = [施钾处理成熟期植株钾积累量 (kg/hm²) - 不施钾处理成熟期植株钾积累量 (kg/hm²)]/施钾量 (kg/hm²) × 100;

钾肥偏生产力 (KFPF, kg/kg) = 施钾区产量 (kg/hm²)/施钾量 (kg/hm²);

营养器官钾素转运量 (KTA, kg/hm²) = 吐丝期营养器官钾素积累量 (kg/hm²) - 成熟期营养器官钾素积累量 (kg/hm²);

钾素转运率 (KTE, %) = 营养器官钾素转运量 (kg/hm²)/吐丝期营养器官钾素积累量 (kg/hm²) × 100;

钾素转运贡献率 (KCP, %) = 营养器官钾素转运量 (kg/hm²)/成熟期籽粒钾素积累量 (kg/hm²) × 100;

百千克籽粒需钾量 (K absorption of 100 kg grain, kg) = 植株总吸钾量 (kg/hm²)/玉米产量 (kg/hm²) × 100。

数据统计分析采用 Microsoft Excel 和 SPSS 13.0 软件,将两年的数据平均后采用 LSD 法(最小显著差异法)进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 施钾量对玉米干物质积累的影响

适宜的钾肥用量对玉米地上部干物质积累具有重要的促进作用(表 1),在大喇叭口期,玉米干物质积累量随施钾量的增加而增加,但增幅逐渐缩小,以 K180 处理(180 kg/hm²)干物质积累量最高,两年趋势一致。大喇叭口期, K45、K90、K135、K180 处理两年平均,分别较对照(K0)增加 10.1%、26.9%、33.8% 和 37.3%。吐丝以后,玉米地上部干重则随施钾量的增加而先增后降,以 K90 处理最高,吐丝期、灌浆期和成熟期 K90 处理两年平均,分别较对照(K0)增加 17.1%、32.4% 和 19.6%。施钾量超过 K90 处理后干物质积累量开始下降,表明过多施

表 1 不同施钾量对玉米植株地上干物重的影响 (t/hm²)
Table 1 Effect of different K treatments on overground parts dry matter weight of maize

施钾量 K ₂ O rate (kg/hm ²)	大喇叭口期 Big trumpet period	吐丝期 Silking stage	灌浆期 Filling stage	成熟期 Mature stage
0	2.68 d	6.11 bc	11.01 e	15.55 d
45	2.95 c	6.28 b	13.41 b	16.67 bc
90	3.40 b	7.16 a	14.58 a	18.60 a
135	3.59 a	5.90 cd	12.44 c	16.95 b
180	3.68 a	5.63 d	11.61 d	16.45 c

注 (Note): 结果为两年的平均值 The data is average of two years; 同列数据后不同小写字母表示差异达 5% 显著水平 Values followed by different small letters in the same column are significantly different at the 5% level.

用钾肥并不能促进玉米生育后期干物质的积累,因此钾肥用量要适宜。

2.2 施钾量对玉米产量及其构成因素的影响

钾肥不仅影响玉米的干物质积累,也影响最终的籽粒产量,处理间差异达到显著水平(表 2)。玉米籽粒产量与中后期的干物质积累变化规律一样,也随施钾量的增加而先增后降,以 K90 处理产量最高,2013 年和 2014 年分别比对照(K0)增产 737.3 kg/hm² 和 800.1 kg/hm²,增幅分别为 8.4% 和 9.2%。过量施钾产量并未随之提高,反而有所下降,2013 年和 2014 年的 K180 处理较最高产量(K90 处理)分别下降了 6.7% 和 6.8%。通过二次曲线 ($Y = a + bx - cx^2$) 模拟产量和施钾量的关系,得出 2013 年和 2014 年一元二次钾肥效应方程为 $Y = 8691.9572 + 12.5575X - 0.065303X^2$ ($R^2 = 0.7410^{**}$) 和 $Y = 8690.7339 + 13.5201X - 0.071116X^2$ ($R^2 = 0.7516^{**}$)。可以看出,两年的玉米产量均随着钾肥施用量的增加而呈开口向下的抛物线变化规律增减,在施钾量分别为 96.2 和 95.1 kg/hm² 时玉米达到最高产量 9295.6 和 9333.3 kg/hm²。

适宜的钾肥用量促进了灌浆结实,增加了穗粒数,提高了千粒重,增加产量。K90 处理穗粒数和千粒重两年平均,分别较对照(K0)提高 5.2% 和 5.6%。由此可见钾肥对千粒重的影响较大,其次为穗粒数。就穗粒数的构成而言,适宜的钾肥既可以提高穗行数,也能提高行粒数,两年试验结果一致。

表 2 不同施钾量玉米产量及其构成因素
Table 2 Yield component and yield of maize under different K application rates

施钾量(kg/hm ²) K ₂ O rate	穗行数 No. of ear row	行粒数 Grains per row	穗粒数 Grains per ear	千粒重(g) 1000-kernel weight	产量(kg/hm ²) Yield
0	18.75 b	39.02 bc	731.39 c	258.28 c	8726.05 e
45	18.82 b	39.50 ab	743.23 b	264.51 b	9009.75 c
90	19.23 a	40.00 a	769.46 a	272.68 a	9494.77 a
135	18.84 b	38.84 c	731.54 c	267.98 ab	9095.45 b
180	18.65 b	38.97 bc	726.77 c	266.78 ab	8854.45 d

注(Note): 结果为两年的平均值 The data is average of two years; 同列数据后不同小写字母表示差异达 5% 显著水平 Values followed by different small letters in the same column are significantly different at the 5% level.

2.3 钾肥水平对玉米植株含钾量的影响

在玉米生长的中后期,随着生育进程的推进,植株的钾含量逐渐降低,两年试验结果一致。在大喇叭口期、吐丝期、灌浆期和成熟期,所有处理两年平均,全株(地上部)的钾含量分别为 2.4%、1.7%、1.1% 和 0.8%,成熟期只有大喇叭口期的约 1/3,吐丝期的约 1/2。其中以生殖器官的含钾量下降幅度最大,营养器官下降幅度相对较小,成熟期雄

穗、雌穗、叶片的钾含量分别约是其吐丝期的 1/7、1/4 和 1/2,茎鞘成熟期的含钾量与吐丝期差异不大,但较大喇叭口期降低了约 50%。

钾肥水平对各时期各器官的含钾量均有不同程度影响(表 3)。总体而言,各器官和全株的含钾量均随钾肥水平的提高而增加,以 K180 处理最高,其中对营养器官的影响较大,特别是茎鞘,对生殖器官的影响相对较小。成熟期 K45、K90、K135、K180

表 3 不同施钾量时玉米不同生育时期各器官含钾量(%)
Table 3 K content in different organs of maize under different K application rates

生育时期 Growth stage	施钾量(kg/hm ²) K ₂ O rate	茎鞘 Stem and sheath	叶片 Leaf	雄穗 Tassel	雌穗 Ear	全株 Whole plant
大喇叭口期 Big trumpet period	0	2.700 c	1.925 d	2.626 a	—	2.260 c
	45	3.196 a	2.073 c	2.570 a	—	2.547 a
	90	2.842 bc	2.096 bc	2.408 b	—	2.431 b
	135	2.758 c	2.143 ab	2.531 a	—	2.436 b
	180	2.985 b	2.196 a	2.411 b	—	2.569 a
吐丝期 Silking stage	0	1.035 c	2.074 b	1.371 b	1.889 ab	1.536 c
	45	1.367 ab	2.251 a	1.412 ab	1.726 ab	1.704 b
	90	1.255 b	2.137 b	1.396 b	1.677 b	1.593 c
	135	1.513 a	2.154 ab	1.465 a	1.940 a	1.775 ab
	180	1.496 a	2.261 a	1.411 b	1.776 ab	1.787 a
灌浆期 Filling stage	0	1.392 b	1.696 b	1.142 a	0.791 a	1.069 b
	45	2.024 a	1.799 a	1.082 b	0.677 b	1.126 a
	90	1.843 a	1.778 a	1.039 bc	0.725 ab	1.120 ab
	135	1.384 b	1.687 b	1.061 bc	0.673 b	0.976 c
	180	1.842 a	1.807 a	1.026 c	0.696 b	1.131 a
成熟期 Mature stage	0	1.076 c	1.224 c	0.229 a	0.487 c	0.684 d
	45	1.340 b	1.336 c	0.231 a	0.519 b	0.769 c
	90	1.396 b	1.519 ab	0.239 a	0.522 ab	0.793 bc
	135	1.371 b	1.464 b	0.204 b	0.541 ab	0.815 b
	180	1.544 a	1.579 a	0.207 b	0.548 a	0.858 a

注(Note): 结果为两年的平均值 The data is average of two years; 同列数据后不同小写字母表示差异达 5% 显著水平 Values followed by different small letters in the same column are significantly different at the 5% level.

处理两年平均,与对照(K0)相比,茎鞘的含钾量分别提高 24.5%、29.7%、27.4%、43.5%,叶片的含钾量分别提高 9.2%、24.1%、19.7%、29.0%,全株含钾量相应地分别提高 12.4%、15.9%、19.1%、25.4%。

2.4 钾肥水平对玉米植株钾积累量的影响

随着生育进程的推进,玉米植株的钾素积累量逐渐增加,但灌浆期以后由于根系吸钾能力逐渐降低,加之部分雄穗和叶片的脱落以及钾的外渗、淋失等原因,钾积累量不增反降,表明钾素的吸收积累主要在中前期和灌浆初期。

由于钾肥水平既影响玉米植株的含钾量,也影响其干物质积累,因而显著影响各时期植株的钾素积累量(表4)。在吐丝以前,植株的钾积累量随钾肥水平的提高而提高,以 K180 处理最高,但吐丝以后则随钾肥水平的提高而先增加后略降低,以 K90 处理最高,这是因为植株体内的含钾量虽然随施钾

量的增加而增加(表3),但 K90 处理的干物质积累量却最高(表1),表明钾肥用量并不是越多越好。

2.5 施钾量对钾素利用率的影响

钾素利用率可用钾生理效率(反映作物吸收钾量对生物量的贡献)、钾素利用效率(反映作物吸收钾量对籽粒产量的贡献)和钾收获指数(反映钾素在植株营养器官与生殖器官间的分配)等指标表征^[20]。从表5可以看出,随施钾量的增加,钾生理效率、钾素利用效率和钾肥当季回收率呈降低趋势,而对钾素收获指数影响不显著。钾素吸收效率、钾肥偏生产力均随施钾量的增加显著降低,K45 处理显著高于其他处理。钾素农学利用率随施钾量的增加呈先升高后逐渐降低的趋势,以 K90 处理钾素农学利用率最高,2013 年和 2014 年分别约是 K180 处理的 7 倍和 10 倍。并且,钾素农学利用率在 K180 出现了近零值,表明过量施钾降低花后钾素从营养器官向籽粒的转移。综上说明适量施钾有助于植株对钾素的吸收(表5)。

2.6 施钾量对钾素转运的影响

吐丝前营养器官钾素转运量、钾素转运率、钾素转运贡献率均随施钾量的增加呈降低的趋势,两年试验结果基本一致(表6)。K180 处理两年平均,营养器官钾素转运量、钾素转运率和钾素转运贡献率较出现最大值的处理 K45 分别下降 88.4%、88.1% 和 88.0%。籽粒吸钾量随施钾量的增加小幅提高,但增幅随钾肥使用量增加而逐渐减小,说明籽粒吸钾量达到一定程度后,钾素供应的增加不会进一步提高玉米籽粒对钾的吸收(表6)。以上表明,适量施用钾肥能促进各营养器官钾素的转运量

表 4 不同施钾量玉米植株钾积累量 (kg/hm²)

Table 4 Plant K accumulation of maize under different K₂O input rates

施钾量 K ₂ O rate (kg/hm ²)	大喇叭口期 Big trumpet period	吐丝期 Silking stage	灌浆期 Filling stage	成熟期 Mature stage
0	60.68 e	95.41 d	118.68 d	107.32 d
45	74.99 d	108.68 b	150.94 b	131.42 c
90	82.74 c	115.95 a	162.77 a	148.69 a
135	87.44 b	106.52 bc	123.28 d	141.36 b
180	94.60 a	102.31 c	135.43 c	140.72 b

注(Note): 结果为两年的平均值 The data is average of two years; 同列数据后不同小写字母表示差异达 5% 显著水平 Values followed by different small letters in the same column are significantly different at the 5% level.

表 5 施钾量对玉米钾素利用的影响

Table 5 Effects of the K application rates on K utilization of maize

施钾量 K ₂ O rate (kg/hm ²)	钾生理效率 KPE (kg/kg)	钾素 利用效率 KUTE (kg/kg)	钾素 收获指数 KHI (%)	钾素 吸收效率 KUPE (kg/kg)	钾肥 农学利用率 KAE (kg/kg)	钾素 当季回收率 KRE (%)	钾肥 偏生产力 KPPF (kg/kg)
0	144.91 a	81.62 a	26.81 a	—	—	—	—
45	127.13 b	69.26 b	24.63 ab	2.92 a	6.70 b	53.47 a	200.22 a
90	125.22 b	64.00 cd	23.17 b	1.65 b	8.74 a	46.01 a	105.50 b
135	120.36 c	64.67 c	24.74 ab	1.05 c	2.87 c	25.24 b	67.38 c
180	114.66 d	61.76 d	24.23 ab	0.80 d	0.81 d	20.24 b	49.19 d

注(Note): KPE—K physiological efficiency; KUTE—K utilization efficiency; KHI—K harvest index; KUPE—K uptake efficiency; KAE—K agronomy efficiency; KRE—K recovery efficiency; KPPF—K partial factor productivity. 结果为两年的平均值 The data is average of two years; 同列数据后不同小写字母表示差异达 5% 显著水平 Values followed by different small letters in the same column are significantly different at the 5% level.

表 6 不同施钾量玉米营养器官钾素向籽粒的转运及对籽粒钾的贡献率

Table 6 Transfer of K in maize and their contribution to total grain K absorption under different K application rates

施钾量(kg/hm ²) K ₂ O rate	钾素转运量(kg/hm ²) K translocation amount	钾素转运率(%) K translocation efficiency	籽粒吸钾量(kg/hm ²) Grain K absorption	钾素转运贡献率(%) K contribution proportion
0	15.76 b	21.09 b	28.60 b	54.37 b
45	27.99 a	29.00 a	32.00 ab	86.01 a
90	5.22 c	5.71 c	34.28 a	16.30 c
135	3.86 c	3.61 c	34.89 a	10.65 c
180	3.26 c	3.46 c	34.71 a	10.34 c

注(Note): 结果为两年的平均值 The data is average of two years. 同列数据后不同小写字母表示差异达 5% 显著水平 Values followed by different small letters in the same column are significantly different at the 5% level.

及转运率,满足了钾循环的需要,这将使植株获得充足的钾素营养,有益于叶片的光合作用和渗透势的调节,且显著提高了对玉米籽粒钾素的贡献率,从而提高了产量。

3 讨论

3.1 施钾量对玉米产量的影响

玉米施肥要能够满足玉米植株生长发育及产量形成对各种营养的需求,使玉米植株健壮生长,达到高产。研究^[20-23]表明,施肥量和产量之间并不是完全呈正比关系,超量施肥和施肥不足均不能获得最佳产量。谭德水等^[21]研究指出,连续 13 年的长期施钾可以提高东北地区黑土、草甸土上的玉米产量。本试验条件下,施钾使玉米产量增加了 1.2%~9.2%,较前人研究结果^[20, 22]稍低。王宜伦等^[20]在河南潮土上的相关研究发现,施肥具有增产效应,增产幅度为 4.68%~14.35%,佟玉欣等^[22]在黑龙江黑钙土上得到的增产幅度为 7.0%~14.0%,这可能是受南北地域环境、土壤肥力、土壤类型、气候及品种等因素的影响。左启华等^[23]研究结果表明,钾肥还可以显著提高饲用玉米的生物学产量,增产 5.3%~27.7%,本研究结果与之基本一致。本研究还表明,玉米干物质积累量和籽粒产量随施钾量的增加并未持续增加,而表现为先增后减的变化趋势,这与前人研究结果^[9, 24-25]基本相符。相关研究表明,叶片光合作用是作物干物质形成的物质基础,可以认为玉米的干物质积累全部来自于叶片^[26]。适量施用钾肥可促进叶片叶绿素的合成和稳定^[27],有利于叶绿体中类囊体的形成^[28],改善叶绿体结构及功能,提高叶绿素 a,叶绿素 b 及叶绿素总量,延缓叶绿体降解与破坏,显著提高叶绿体的 Hill 反应及光合磷酸化活力,促进二氧化碳在低浓度、弱光条

件下进行光合作用,使作物更有效地利用太阳能^[29-30],K⁺的存在还有利于保持光照下叶绿体及类囊体的跨膜质子梯度,并使叶绿体基质保持 CO₂ 同化所需的较高的 pH 值,促进了光合磷酸化及 CO₂ 的同化^[31],从而提高玉米干物质积累量。适量施用钾肥还可通过增加穗行数、行粒数和穗粒重从而使穗粒数和千粒重增加^[5, 11, 20, 25],进而提高玉米籽粒产量。但施用钾肥也并非越多越好,施钾过量会造成叶片的叶绿素含量下降^[32],叶片的光合持续期缩短^[33],光合效率降低^[34-35],还会降低作物对氮磷元素的吸收量^[36-38],阻碍作物的生长发育,而且过量施用钾肥可能影响土壤中交换性 K⁺/(Ca²⁺ + Mg²⁺) 的正常比值,造成玉米吸钾过多,使玉米吸收 K⁺ 和 Ca²⁺ + Mg²⁺ 的比例失调,影响玉米灌浆过程^[39],最终导致干物质积累量和籽粒产量下降。

3.2 施钾量对玉米钾素利用的影响

玉米钾素利用效率的高低对玉米植株生长发育及高效株型的形成具有重要的影响。钾吸收利用效率的提高有利于形成合理的生育群体和高效株型,为玉米的高效生产奠定结构基础,另一方面则有利于玉米养分运转和协调分配,从而为玉米产量的提高奠定生理基础。农学利用率、吸收效率和肥料的偏生产力都是表示养分利用率的常用定量指标,可以从不同的侧面描述作物对肥料的利用率^[40]。本研究表明,钾肥偏生产力随施钾量的增加而显著下降,在施钾肥量为 90 kg/hm² 时,玉米产量达到最高水平,钾肥农学利用率也最高。

籽粒中的养分,一部分源于根系直接吸收,一部分源于营养器官的养分再转移。何萍等^[12]研究发现,玉米钾素与氮、磷的积累不同,其吸收主要在生育进程的中前期进行,到灌浆期已积累了总量的 82.8%~95.5%,此后仅有少量吸收。李飒等^[41]也

指出,玉米对钾素的吸收主要在吐丝前完成,吐丝后钾素累积速率明显下降。李文娟等^[9]的研究结果显示,籽粒中 52.4%~100% 的钾依赖于营养体的转运。本研究结果表明,川中丘陵春玉米吐丝前吸收钾素量占全生育期总量的 72.7%~88.9%,钾素的吸收主要在吐丝前,灌浆初期也仍有较大量的吸收积累,而成熟籽粒中的钾素主要来源于营养器官的转移。

3.3 施钾量对籽粒钾素吸收量的影响

随着生产水平的提高,玉米植株对养分的吸收利用和分配会发生较大的变化,以往的研究多集中在氮素的需求上^[14],缺乏对钾素的深入研究。人们通常认为,每生产 100 kg 玉米籽粒,需要的 N:P₂O₅:K₂O 为 3:1:3^[42],而何萍和金继运^[12]研究指出,玉米每生产 100 kg 籽粒需要 N 1.954 kg、P 0.376 kg、K 1.390 kg。本研究中就 2013 年和 2014 年的春玉米最高产量而言,每生产 100 kg 玉米籽粒需吸收 K₂O 分别为 1.460 kg 和 1.638 kg。

本研究所用品种“正红 505”为四川省农业厅推荐的目前川中丘陵应用面积最大的品种之一,在同一地点进行了两年定位试验,所得结果对指导该品种在类似气候土壤生态区的高产栽培有重要意义。该品种在其他生态区和其他品种在本生态区的钾肥利用特性尚需进一步研究。

4 结论

研究表明,合理施用钾肥能有效促进玉米植株对钾素的吸收,增加花前各营养器官贮存的钾素向籽粒的再转运,提高转运量、转运率、转运贡献率及钾利用效率,从而提高玉米产量。综合考虑玉米籽粒产量、钾吸收利用特性、生产成本和经济效益等因素,本试验条件下川中丘陵春玉米推荐的钾肥施用量应该在 90 kg/hm² 左右。

参考文献:

[1] Epstein E, Bloom A J. Mineral nutrition of plants: Principles and perspectives[M]. Sunderland, United States: Sinauer Associates, Incorporated, 2005.

[2] Ghana K. Genotypic differences in potassium response and praline accumulation in maize during wilting [J]. Plant & Cell Physiology, 1980, 21(1): 197-200.

[3] 李庆逵,朱兆良,于天仁. 中国农业持续发展中的肥料问题[M]. 南昌:江西科学技术出版社,1998. 69-85.

Li Q K, Zhu Z L, Yu T R. Fertilizer questions in sustainable development of agriculture in China [M]. Nanchang: Jiangxi

Science and Technology Press, 1998. 69-85.

[4] 汪霄,张过师,陈防. 不同基因型作物及其根际钾素高效利用机理的研究进展[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(4): 600-604.

Wang X, Zhang G S, Chen F. Research advances on the mechanism of high potassium use efficiency of varied genotypes crops and their rhizospheres [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2011, 50(4): 600-604.

[5] 王秀芳,张宽,王立春,等. 钾肥施用对玉米干物质生产及籽粒产量影响研究[J]. 玉米科学, 2004, 12(3): 92-95.

Wang X F, Zhang K, Wang L C, et al. Study on the effect of potassium fertilizer application on dry matter production and main yield components of maize [J]. Journal of Maize Sciences, 2004, 12(3): 92-95.

[6] 谢建昌,周健民,Hardter R. 钾与中国农业[M]. 南京:河海大学出版社,2000. 142-155.

Xie J C, Zhou J M, Hardter R. Potassium and Chinese agriculture [M]. Nanjing: Hohai University Press, 2000. 142-155.

[7] 王强盛,甄若宏,丁艳峰,等. 钾肥用量对优质粳稻钾素积累利用及稻米品质的影响[J]. 中国农业科学, 2004, 37(10): 1444-1450.

Wang Q S, Zhen R H, Ding Y F, et al. Effects of potassium fertilizer application rates on plant potassium accumulation and grain quality of Japonica rice [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(10): 1444-1450.

[8] 谭德水,金继运,黄绍文,等. 灌淤土区长期施钾对作物产量与养分及土壤钾素的长期效应研究[J]. 中国农业生态学报, 2009, 17(4): 625-629.

Tan D S, Jin J Y, Huang S W, et al. Effect of long-term potassium application on irrigated soil potassium and on the yield and nutrient of crops [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17(4): 625-629.

[9] 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.

Li W J, He P, Jin J Y. K nutrition on dry matter and nutrients accumulation and translocation at reproductive stage of maize [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(4): 799-807.

[10] 张玉芹,杨恒山,高聚林,等. 施钾方式对高产春玉米钾素养分吸收、积累与转运的影响[J]. 华北农学报, 2014, 29(3): 193-198.

Zhang Y Q, Yang H S, Gao J L, et al. Effects of potassium fertilization methods on potassium absorption and translocation of high yield spring maize [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2014, 29(3): 193-198.

[11] 郭中义,孟祥峰,张明,等. 施用氮磷钾肥对夏玉米产量和品质的影响[J]. 土壤肥料, 2004, (1): 25-26.

Guo Z Y, Meng X F, Zhang M, et al. Effect of nitrogenous, phosphate and potash fertilizer on yield and quality of summer maize [J]. Soil and Fertilizer, 2004, (1): 25-26.

[12] 何萍,金继运. 氮钾互作对春玉米养分吸收动态及模式的影响[J]. 玉米科学, 1999, 7(3): 68-72.

- He P, Jin J Y. Dynamics and models of N, P and K absorption by spring maize as influenced by nitrogen and potassium interaction [J]. *Journal of Maize Sciences*, 1999, 7(3): 68-72.
- [13] 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.
- He P, Jin J Y, Li W J, *et al.* Comparison of potassium absorption, yield and quality between high-oil and common corn affected by potassium application [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(5): 620-626.
- [14] 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.
- 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.
- [15] 张文婧, 王昌全, 袁大刚, 等. 四川省主要作物施肥现状、问题与对策 [J]. *土壤通报*, 2014, 45(3): 697-703.
- Zhang W J, Wang C Q, Yuan D G, *et al.* Status, problems and countermeasures of main crops' fertilizer application in Sichuan province [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(3): 697-703.
- [16] 鲍士旦. *土壤农化分析(第三版)* [M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- Bao S D. *Soil agro-chemical analysis (3rd edition)* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2010.
- [17] Fageria N K, de Moraes O P, dos Santos A B. Nitrogen use efficiency in upland rice genotypes [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2010, 33: 1696-1711.
- [18] 易镇邪, 王璞, 陈平平, 等. 氮肥类型对夏玉米氮素吸收和利用的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(3): 472-478.
- Yi Z X, Wang P, Chen P P, *et al.* Effect of different types of nitrogen fertilizer on nitrogen absorption and utilization of summer maize [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(3): 472-478.
- [19] Baligar V C, Fageria N K, He Z L. Nutrient use efficiency in plants [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2001, 32: 921-950.
- [20] 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): 110-114.
- Wang Y L, Tan J F, Han Y L, *et al.* Effects of different potassium fertilizer application rates on yield, plant potassium accumulation of summer maize and potassium efficiency in alluvial soil [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2009, 22(1): 110-114.
- [21] 谭德水, 金继运, 黄绍文. 东北地区黑土、草甸土长期施钾对玉米产量及耕层土钾素形态的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 15(4): 850-855.
- Tan D S, Jin J Y, Huang S W. Effect of long-term potassium application on corn yield and potassium forms in plough layer of black soil and meadow soil in northeast of China [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 15(4): 850-855.
- [22] 佟玉欣, 李玉影, 刘双全, 等. 钾肥不同施用量对玉米产量和效益及钾素平衡的影响 [J]. *黑龙江农业科学*, 2010, (11): 45-48.
- Tong Y X, Li Y Y, Liu S Q, *et al.* Effect of potassium fertilizer on yield, benefit of maize and potassium balance of soil-crop system [J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2010, (11): 45-48.
- [23] 左启华, 张立峰, 李会彬, 等. 施钾对高寒区饲用玉米产量与营养品质以及伤流液的影响 [J]. *西北农业学报*, 2011, 20(1): 65-69.
- Zuo Q H, Zhang L F, Li H B, *et al.* Effect of potassium application on biomass, nutritional quality and bleeding sap of forage maize in cold plateau [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2011, 20(1): 65-69.
- [24] 刘淑霞, 吴海燕, 赵兰波, 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.
- Liu S X, Wu H Y, Zhao L B, *et al.* Effects of different potassium rates on potassium absorption and utilization by maize plant [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2008, 16(4): 172-175.
- [25] 包岩, 王震, 吕艳杰, 等. 郑单 958 玉米品种在吉林省西部地区施用钾肥效应研究 [J]. *农业与技术*, 2012, 32(10): 10-11.
- Bao Y, Wang Z, Lü Y J, *et al.* Effect of potassium fertilizer on Zhengdan 958 in the western area of Jilin province [J]. *Agriculture & Technology*, 2012, 32(10): 10-11.
- [26] 郑丕尧. *作物生理学导论* [M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1992.
- Zheng P Y. *Introduction to crop physiology* [M]. Beijing: Beijing Agriculture University Press, 1992.
- [27] 陈建忠, 肖荷霞, 毛彩云, 等. 钾肥对玉米子粒灌浆的影响研究 [J]. *玉米科学*, 2008, 16(6): 146-148.
- Chen J Z, Xiao H X, Mao C Y, *et al.* Study on grouting of corn seeds in the condition of fertilizing K_2O [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2008, 16(6): 146-148.
- [28] Taiji I, Susumu T. Studies on ultrastructure and function of photosynthetic apparatus in rice cells i. effects of light intensity and temperature on plastid development of *oryza sativa* [J]. *Japanese Journal of Crop Science*, 1987, 56(1): 85-91.
- [29] 饶立华, 薛建明, 蒋德安, 等. 钾营养对杂交稻光合作用动态及产量形成的效应 [J]. *中国水稻科学*, 1990, 4(3): 106-112.
- Rao L H, Xue J M, Jiang D A, *et al.* Effect of potassium on dynamic aspects of photosynthesis and yield formation of hybrid rice plants [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 1990, 4(3): 106-112.
- [30] 赵永志, 王俊英, 王义忠, 等. 钾素对小麦生长发育及籽粒产量的影响 [J]. *洛阳农业高等专科学校学报*, 1999, 19(2): 8-10.
- Zhao Y Z, Wang J Y, Wang Y Z, *et al.* Effect of potassium on

- growth and grain production of winter wheat [J]. Journal of Luoyang Agricultural College, 1999, 19(2): 8-10.
- [31] Huber S C. Role of potassium in photosynthesis and respiration [A]. Muson R D. Potassium in agriculture [C]. Madison, Wisconsin: Soil Science Society of America, 1985. 369-396.
- [32] 王俊侠, 范惠菊. 水分和钾肥对冬小麦旗叶光合特性的影响[J]. 河北农业科学, 2006, 10(3): 43-45.
Wang J X, Fan H J. The effect of irrigation times and potash fertilizer on the photosynthetic characteristics of flag leaf on winter wheat [J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2006, 10(3): 43-45.
- [33] 王帅, 杨劲峰, 韩晓日, 等. 不同施肥处理对旱作春玉米光合特性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2008, (6): 23-27.
Wang S, Yang J F, Han X R, *et al.* Effect of fertilizer application on photosynthetic traits of spring maize [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2008, (6): 23-27.
- [34] 张铭. 钾肥不同施用量对玉米主要生理、生化指标的影响研究[D]. 吉林: 吉林大学硕士学位论文, 2009.
Zhang M. Study on the effect of potassium fertilizer on the indexes of physiological and biochemical of maize [D]. Jilin: MS Thesis of Jilin University, 2009.
- [35] 于振文, 张炜, 岳寿松, 等. 钾营养对冬小麦光合作用和衰老的影响[J]. 作物学报, 1996, 22(3): 305-312.
Yu Z W, Zhang W, Yue S S, *et al.* Effect of potassium on photosynthesis and senescence in winter wheat [J]. Acta Agronomica Sinica, 1996, 22(3): 305-312.
- [36] 郑福丽, 刘兆辉, 张文君, 等. 不同钾肥用量对玉米产量和土壤养分的影响[J]. 山东农业科学, 2006, (6): 50-52.
Zheng F L, Liu Z H, Zhang W J, *et al.* Effect of different potassium application rates on maize yield and soil nutrient [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2006, (6): 50-52.
- [37] 邹国元, 李晓林, 杨志福. 不同温度下施用钾肥对玉米生长及磷钾养分吸收的影响[J]. 华北农学报, 1998, 13(4): 51-55.
Zou G Y, Li X L, Yang Z F. Effect of potassium fertilizers on growth and nutrient uptake of maize plants at low temperature [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 1998, 13(4): 51-55.
- [38] 王学忠. 2012年覆膜玉米钾肥施用量试验研究[J]. 现代农业科技, 2013, (4): 12-13.
Wang X Z. Study on the potassium fertilizer application on plastic film mulching maize in 2012 [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2013, (4): 12-13.
- [39] 张会军, 刘婧, 卞晓丽, 等. 钾肥对垦单5号玉米产量的影响[J]. 现代化农业, 2011, (12): 24-25.
Zhang H J, Liu J, Bian X L, *et al.* Effect of potassium fertilizer on yield benefit of Kendan No. 5 maize [J]. Modernizing Agriculture, 2011, (12): 24-25.
- [40] 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.
Li B, Zhang J W, Jin L B, *et al.* Effects of potassium fertilization on yield, potassium use efficiency of summer maize under high yield conditions [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(4): 832-838.
- [41] 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.
Li S, Peng Y F, Yu P, *et al.* Accumulation and distribution of dry matter and potassium in maize varieties released in different years [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(2): 325-332.
- [42] 于振文, 赵明, 王伯伦, 等. 作物栽培学各论(北方本)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003. 117.
Yu Z W, Zhao M, Wang B L, *et al.* Crop cultivation science [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2003. 117.