

减量分施钾肥对旱地马铃薯产量和钾肥利用率的影响

尹梅¹, 曾庆凤², 张琼², 侯俊², 张发奎²,
陈华¹, 陈检锋¹, 王志远¹, 付利波¹, 苏帆¹

(1. 云南省农业科学院农业环境资源研究所, 云南昆明 650205; 2. 云南省会泽县土壤肥料工作站, 云南会泽 654299)

摘要: 在云南省会泽县高、低肥力土壤上分别开展旱作马铃薯的钾肥减量分施试验, 研究 100%、90%、70% 钾肥一次性施用, 90% 和 70% 钾肥不同比例分次施用对马铃薯产量、经济效益、钾肥利用率、钾肥农学效率和钾肥偏生产力的影响。结果显示: 钾肥对马铃薯生长影响较大, 施钾处理的产量比无钾处理高 17.39% ~ 42.88%, 施钾处理的净收益比无钾处理高 15.40% ~ 40.92%; 同一处理的马铃薯产量、效益、钾肥利用率、钾肥农学效率和钾肥偏生产力等在高肥力土壤上均优于其在低肥力土壤上。无论在高、低肥力土壤上, 施用钾肥量相同时, 钾肥后期多施的 90% K(30% + 60%) 处理和 70% K(20% + 50%) 处理产量高于钾肥分次施用的 90% K(40% + 50%) 处理和 70% K(30% + 40%) 处理, 钾肥分次施用的 90% K(40% + 50%) 处理和 70% K(30% + 40%) 处理产量均高于钾肥一次性施用的 90% K 处理和 70% K 处理。高肥力土壤上, 100% K 处理马铃薯产量为 29 544.44 kg·hm⁻², 是所有处理中最高的, 90% K(30% + 60%) 处理产量为 28 770.83 kg·hm⁻², 与 100% K 处理没有显著性差异, 钾肥利用率、钾肥农学效率和钾肥偏生产力最高的是 70% K(20% + 50%) 处理, 分别为 36.84%、58.11 kg·kg⁻¹ 和 222.22 kg·kg⁻¹。低肥力土壤上, 钾肥施用时期后移的 90% K(30% + 60%) 处理和 70% K(20% + 50%) 处理产量、钾肥利用率、钾肥农学效率和钾肥偏生产力均高于 100% K 处理; 90% K(30% + 60%) 处理产量、钾肥利用率、钾肥农学效率和钾肥偏生产力分别为 17 640.28 kg·hm⁻²、20.24%、31.13 kg·kg⁻¹ 和 108.89 kg·kg⁻¹, 70% K(20% + 50%) 处理分别为 17 404.17 kg·hm⁻²、26.57%、38.15 kg·kg⁻¹ 和 138.13 kg·kg⁻¹, 100% K 处理分别为 17 091.67 kg·hm⁻²、17.49%、24.97 kg·kg⁻¹ 和 94.95 kg·kg⁻¹。钾肥减量分施效果优于钾肥一次性施用, 减量分施钾肥在低肥力土壤上的效果比高肥力土壤上的效果显著。高肥力土壤上推荐施用 K₂O 总量 162 kg·hm⁻², 低肥力土壤上推荐施用 K₂O 总量 126 ~ 162 kg·hm⁻², 两种肥力土壤上施用比例均为苗期 30%、现蕾期 70%。

关键词: 马铃薯; 钾肥; 减量分施; 施用时期; 产量; 钾肥利用

中图分类号: S532 **文献标志码:** A

Effect of reduced K amount and split application on yield and nutrient utilization of potato on upland

YIN Mei¹, ZENG Qing-feng², ZHANG Qiong², HOU Jun², ZHANG Fa-kui², CHEN Hua¹,
CHEN Jian-feng¹, WANG Zhi-yuan¹, FU Li-bo¹, SU Fan¹

(1. Agricultural Environment and Resources Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming, Yunnan 650205, China;

2. Fertility Station of Huize in Yunnan Province, Huize, Yunnan 654299, China)

Abstract: The field experiments were conducted on low and high fertility farm land in Yunnan Huize, in order to investigate the effects of reduced K amount and split application on yield, net earning, KUE, KAUE and KPEP of upland potato. The results indicated that K application had significant effect on growth of potato. Yield of potato with K application treatment was higher than yield of potato without K application treatment by 17.39% ~ 42.88%. Net earning with K application treatment was higher than that without K application treatment by 15.40% ~ 40.92%. With the same treatment, the yield, net earning, KUE, KAUE and KPEP of potato in high fertility farm land were higher than those in low

fertility farm land. Both in high fertility farm land and in low fertility farm land, when the same amount of K fertilizer was used, yield and net earning with 90% K(30% + 60%) treatment or 70% K(20% + 50%) treatment are higher than those with 90% K(40% + 50%) treatment or 70% K(30% + 40%) treatment, yield and net earning with 90% K(40% + 50%) treatment or 70% K(30% + 40%) treatment are higher than those with 90% K treatment or 70% K treatment. In high fertility farm land, yield of potato with 100% K treatment was 29 544.44 kg·hm⁻² and it was the highest in all treatments. Yield of potato with 90% K(30% + 60%) treatment was 28 770.83 kg·hm⁻² and it was not significant difference with that with 100% K treatment. KUE, KAUE and KPEP of potato with 70% K(20% + 50%) treatment were higher than those with other treatments and they respectively were 36.84%, 58.11 kg·kg⁻¹ and 222.22 kg·kg⁻¹. In low fertility farm land, yield, KUE, KAUE and KPEP of potato with 90% K(30% + 60%) treatment or 70% K(20% + 50%) treatment were higher than those with 100% K treatment. Yield, KUE, KAUE and KPEP of potato with 90% K(30% + 60%) treatment respectively were 17 640.28 kg·hm⁻², 20.24%, 31.13 kg·kg⁻¹ and 108.89 kg·kg⁻¹, those with 70% K(20% + 50%) treatment respectively were 17 404.17 kg·hm⁻², 26.57%, 38.15 kg·kg⁻¹ and 138.13 kg·kg⁻¹, and those with 100% K treatment respectively were 17 091.67 kg·hm⁻², 17.49%, 24.97 kg·kg⁻¹ and 94.95 kg·kg⁻¹. Effects of reduced K amount and split application on yield, net earning, KUE, KAUE and KPEP of upland potato were better than effect of K application for single base fertilizer. Effect of reduced K amount and split application in low fertility farm land was more significant than that in high fertility farm land. Thus we commended that 162 kg·hm⁻² K₂O in high fertility farm, 126 ~ 162 kg·hm⁻² K₂O in low fertility farm, and K application by 30% in seedling and 70% in squaring stage be adopted for potato production in Yunnan upland.

Keywords: potato; potassium fertilizer; reduced K application; in different proportion by states; yield; potassium use efficiency

钾是植物生长发育必需的营养元素,也是肥料三要素之一,作物要获得优质高产需要有充足的钾素营养。钾主要分布于植物体内的细胞液中,参与多项生理生化代谢,对植物的光合作用、生长发育等活动都有重要影响^[1-3],可提高作物的抗逆性和品质^[1,4]。

马铃薯是云南省继玉米、水稻后的第三大作物,2015年种植面积达到 55.8 万 hm²^[5]。同其他作物一样,氮、磷、钾肥的合理施用是马铃薯良好生长和优质高产的基础^[6-9]。马铃薯是喜钾作物,需较多钾素营养,合理施用钾肥对马铃薯品质和产量影响较大^[10-12]。钾素供应不足会引起马铃薯植株较弱,生长缓慢,抗性较差,块茎产量和品质下降^[13-14];钾素过多会引起马铃薯某些品质指标下降^[15],还会增加成本,造成土壤污染^[16]。

在云南省马铃薯主产区会泽县开展雨养农业区不同钾肥用量和施用时期对马铃薯的经济性状、产量、经济效益和 K 肥利用效率的影响研究,为云南旱地马铃薯的优质生产选择适当的钾肥施用方案,为节本增效提供理论依据和技术基础。

1 材料与方法

1.1 试验设计

研究地位于云南省曲靖市会泽县五星乡竹箐村,海拔 2 340 m,试验土壤为山原红壤坡耕旱地,是云南省典型的雨养农业区。该地年均温 11.3℃,年降水量 800 mm。前茬是绿肥,当地种植轮作制度为马铃薯-绿肥。

在该地高肥力和低肥力土壤分别开展马铃薯减量分期施用钾肥试验,试验地养分状况见表 1。

表 1 试验地养分状况

Table 1 Nutrient status of soils of the field experiments

试验地 Location	pH	有机质 OM /(g·kg ⁻¹)	全 N Total N /(g·kg ⁻¹)	碱解 N Available N /(mg·kg ⁻¹)	全 P Total P /(g·kg ⁻¹)	有效 P Available P /(mg·kg ⁻¹)	全 K Total K /(g·kg ⁻¹)	速效 K Available K /(mg·kg ⁻¹)
高肥力地块 High fertility plot	5.2	42.4	1.9	127.0	1.4	27.4	13.2	113.8
低肥力地块 Low fertility plot	5.0	28.2	1.5	97.3	1.1	18.7	11.7	66.1

两个试验土壤处理一致,均为 8 个处理 3 次重复,随机区组排列,每个处理小区面积为 30 m²。试

验处理如表 2。

表 2 各处理施钾肥量/(kg·hm⁻²)
Table 2 K₂O application amount under different treatments

代号 Code	处理 Treatment	施钾肥量 K application amount	基肥 Base fertilizer	苗期 Seedling	现蕾期 Squaring stage
CK	无钾肥处理 Without K ₂ O fertilizer	0	0	0	0
100% K	100% K ₂ O 一次性施用(常规施钾肥) 100% K ₂ O application for single base fertilizer	180	180	0	0
90% K	90% K ₂ O 一次性施用 90% K ₂ O application for single base fertilizer	162	162	0	0
70% K	70% K ₂ O 一次性施用 70% K ₂ O application for single base fertilizer	126	126	0	0
90% K(40% + 50%)	90% K ₂ O 分次施用(苗期 40% + 现蕾期 50%) Split 90% K ₂ O application(40% K ₂ O application in seedling stage and 50% K ₂ O application in squaring stage)	162	0	72	90
70% K(30% + 40%)	70% K ₂ O 分次施用(苗期 30% + 现蕾期 40%) Split 70% K ₂ O application(30% K ₂ O application in seedling stage and 40% K ₂ O application in squaring stage)	126	0	54	72
90% K(30% + 60%)	90% K ₂ O 后期多施(苗期 30% + 现蕾期 60%) Split 90% K ₂ O application(30% K ₂ O application in seedling stage and 60% K ₂ O application in squaring stage)	162	0	54	108
70% K(20% + 50%)	70% K ₂ O 后期多施(苗期 20% + 现蕾期 50%) Split 70% K ₂ O application(20% K ₂ O application in seedling stage and 50% K ₂ O application in squaring stage)	126	0	36	90

纯 N 和 P₂O₅ 每公顷用量分别为 180 kg 和 60 kg,氮、磷肥全部作底肥一次性施用,钾肥按照表 2 不同处理施用。氮肥为含 N 46% 的普通尿素,磷肥为含 P₂O₅ 12% 的普钙,钾肥为含 K₂O 50% 的硫酸钾。

试验于 2014 年 3 月 14 日播种,10 月 11 日收获。种植密度为 54 000 株·hm⁻²,试验过程中除设计处理差异外,其他均采用同样的管理措施。两组试验均无灌溉措施,完全靠自然降水。

1.2 测定项目与方法

试验前分别在两个试验地取土,取土深度为 20 cm,按 S 形法采集 10 个点,分别混合为一个基础土样。采用铬酸钾容量法测定有机质,玻璃电位法测定 pH,半微量凯氏法测定全 N,碱解扩散法测定碱解 N,碱熔·钼锑抗比色法测定全 P,0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 浸提·钼锑抗比色法测定速效 P,碱熔·火焰光度计法测定全 K,乙酸铵溶液浸提·火焰光度计法测定速效 K^[17~19]。

马铃薯收获时,分小区进行经济性性状测定、测产等。

植株样品采集:在马铃薯收获时取各处理生长中等的 5 棵植株,测定其鲜重,105℃ 杀青后烘干制样,采用烘干称重法测定植株干重,采用硫酸-过氧化氢消煮后火焰光度计法测定植株和薯球样品全 K

含量^[20]。

相关参数计算方法:

施钾效益增加量(元·hm⁻²) = 施钾区产值 - 不施钾区产值 - 施钾区钾肥成本

钾肥利用率(%) = (施钾区吸钾量 - 对照区吸钾量)/施钾量 × 100%

钾肥农学利用率(kg·kg⁻¹) = (施钾区产量 - 对照区产量)/施钾量

钾肥偏生产力(kg·kg⁻¹) = 施钾区产量/钾肥用量

钾素经济学利用效率(kg·kg⁻¹) = 经济学产量/植株钾素吸收量

钾素生物学利用效率(kg·kg⁻¹) = 生物学产量/植株钾素吸收量

数据统计分析采用 EXCEL 和 DPS 软件处理。

2 结果与分析

2.1 减量分施钾肥对马铃薯经济性性状的影响

表 3 显示了两种肥力土壤中减量分施钾肥对马铃薯经济性性状的影响。

在高肥力土壤上,CK 处理的大薯数、中薯数、结薯量和薯重均是所有处理中最低的,薯重与其他处理有显著差异;100% K 处理的经济性状最好,其大薯数、小薯数、结薯量和薯重都是所有处理中最高

的。6 个减量施钾处理的结薯量和薯重之间有一定差异,但不显著。在低肥力土壤上,CK 处理的各个经济性状在所有处理中最差,结薯量和薯重与其他

处理有显著性差异;90% K(30% + 60%)处理和 70% K(20% + 50%)处理结薯量是所有处理中最高的,90% K(30% + 60%)处理薯重较重。

表 3 不同处理的马铃薯经济性状

Table 3 Agronomic traits of potato for different treatments

试验 Trials	处理 Treatment	大薯 Large-size		中薯 Middle-size		小薯 Small-size		结薯量 Amounts of tuber /(个·塘 ⁻¹)	薯重 Fresh weight /(kg·塘 ⁻¹)
		数量 Amount /(个·塘 ⁻¹)	所占比例 Ratio /%	数量 Amount /(个·塘 ⁻¹)	所占比例 Ratio /%	数量 Amount /(个·塘 ⁻¹)	所占比例 Ratio /%		
高肥力 High fertility plot	CK	6.33	36.53	5.33	30.76	5.67	32.72	17.33 b	0.39 c
	100% K	11.33	42.50	8.33	31.25	7.00	26.26	26.67 a	0.57 a
	90% K	9.00	43.54	7.00	33.87	4.67	22.59	20.67 ab	0.53 a
	70% K	7.67	40.37	6.00	31.58	5.33	28.05	19.00 ab	0.48 b
	90% K(40% + 50%)	9.33	43.74	7.33	34.36	4.67	21.89	21.33 ab	0.56 a
	70% K(30% + 40%)	9.33	43.74	7.00	32.82	5.00	23.44	21.33 ab	0.54 a
	90% (30% + 60%)	8.67	37.68	8.67	37.68	5.67	24.64	23.00 ab	0.56 a
	70% K(20% + 50%)	9.67	47.54	6.67	32.79	4.00	19.67	20.33 ab	0.55 a
低肥力 Low fertility plot	CK	3.33	22.20	4.00	26.67	7.67	51.13	15.00 c	0.23 d
	100% K	4.67	21.55	5.33	24.60	11.67	53.85	21.67 ab	0.34 a
	90% K	4.33	22.01	4.67	23.74	10.67	54.25	19.67 ab	0.30 bc
	70% K	4.00	22.22	4.67	25.94	9.33	51.83	18.00 bc	0.29 c
	90% K(40% + 50%)	5.00	23.44	6.33	29.68	10.00	46.88	21.33 ab	0.34 a
	70% K(30% + 40%)	4.67	22.96	5.00	24.58	10.67	52.46	20.33 ab	0.33 ab
	90% K(30% + 60%)	4.67	20.60	5.67	25.01	12.33	54.39	22.67 a	0.35 a
	70% K(20% + 50%)	4.33	19.11	6.33	27.93	12.00	52.96	22.67 a	0.34 a

注:同列不同小写字母代表 5% 的显著性差异,下同。

Note: Different small letters in the same columns mean significant difference at $P \leq 0.05$ level. The same as below.

高肥力土壤各处理结薯量与低肥力土壤略有差异,高肥力土壤上各处理大薯数比例较高,数量明显多于低肥力土壤,低肥力土壤则是小薯数比例高,高肥力土壤各处理薯重高于低肥力土壤,两个肥力水平土壤上决定薯重的主要因素不是结薯量,而是大中小薯比例。

2.2 减量分施钾肥对马铃薯产量的影响

表 4 表明了减量分施钾肥试验各处理马铃薯产量。

高肥力土壤中,各处理产量从高到低依次为:100% K、90% K(30% + 60%)、90% K(40% + 50%)、70% K(20% + 50%)、70% K(30% + 40%)、90% K、70% K 和 CK;100% K 处理产量最高,与 90% K(30% + 60%)处理差异不显著。低肥力土壤上,各处理产量从高到低为:90% K(30% + 60%)、70% K(20% + 50%)、100% K、90% K(40% + 50%)、70% K(30% + 40%)、90% K、70% K 和 CK;90% K(30% + 60%)处理和 70% K(20% + 50%)处

理均为产量高的处理,甚至高于 100% K 处理。

高、低肥力土壤施钾处理的马铃薯产量差异较大,高肥力土壤产量为 24 273.61 ~ 29 544.44 kg·hm⁻²,低肥力土壤为 14 900.00 ~ 17 640.28 kg·hm⁻²,低肥力土壤中最优处理产量也没有高肥力土壤 CK 处理产量高。

减量分期施钾处理对高肥力土壤的产量影响大于对低肥力土壤的影响:在低肥力土壤上,减量分期施钾处理的产量可不低于 100% K 处理,但在高肥力土壤上,减量分期施钾处理的产量均低于 100% K 处理。

无论在高、低肥力土壤,在施用钾肥量相同时,钾肥后期多施的 90% K(30% + 60%)处理和 70% K(20% + 50%)处理产量高于钾肥分次施用的 90% K(40% + 50%)处理和 70% K(30% + 40%)处理,钾肥分次施用的 90% K(40% + 50%)处理和 70% K(30% + 40%)处理产量均高于钾肥一次性施用的 90% K 处理和 70% K 处理。

表 4 不同处理的马铃薯产量

Table 4 Yield of potato with different treatments

试验 Trials	处理 Treatment	产量 Yield /(kg·hm ⁻²)	相比 CK Compared with CK		相比 100% K Compared with 100% K		相比 90% K Compared with 90% K		相比 70% K Compared with 70% K	
			/(kg·hm ⁻²)	/%	/(kg·hm ⁻²)	/%	/(kg·hm ⁻²)	/%	/(kg·hm ⁻²)	/%
高肥力 High fertility plot	CK	20677.78 d	—	—	-8866.66	-30.01	-6365.28	-23.54	-3595.83	-14.81
	100% K	29544.44 a	8866.66	42.88	—	—	2501.38	9.25	5270.83	21.71
	90% K	27043.06 b	6365.28	30.78	-2501.38	-8.47	—	—	2769.45	11.41
	70% K	24273.61 c	3595.83	17.39	-5270.83	-17.84	-2769.45	-10.24	—	—
	90% K(40% + 50%)	28611.11 ab	7933.33	38.37	-933.33	-3.16	1568.05	5.80	4337.50	17.87
	70% K(30% + 40%)	27137.50 b	6459.72	31.24	-2406.94	-8.15	94.44	0.35	2863.89	11.80
	90% K(30% + 60%)	28770.83 a	8093.05	39.14	-773.61	-2.62	1727.77	6.39	4497.22	18.53
	70% K(20% + 50%)	28000.00 ab	7322.22	35.41	-1544.44	-5.23	956.94	3.54	3726.39	15.35
低肥力 Low fertility plot	CK	12597.22 e	—	—	-4494.45	-26.30	-3238.89	-20.45	-2302.78	-15.45
	100% K	17091.67 ab	4494.45	35.68	—	—	1255.56	7.93	2191.67	14.71
	90% K	15836.11 c	3238.89	25.71	-1255.56	-7.35	—	—	936.11	6.28
	70% K	14900.00 d	2302.78	18.28	-2191.67	-12.82	-936.11	-5.91	—	—
	90% K(40% + 50%)	17081.94 ab	4484.72	35.60	-9.73	-0.06	1245.83	7.87	2181.94	14.64
	70% K(30% + 40%)	16408.33 bc	3811.11	30.25	-683.34	-4.00	572.22	3.61	1508.33	10.12
	90% K(30% + 60%)	17640.28 a	5043.06	40.03	548.61	3.21	1804.17	11.39	2740.28	18.39
	70% K(20% + 50%)	17404.17 a	4806.95	38.16	312.50	1.83	1568.06	9.90	2504.17	16.81

2.3 减量分施钾肥试验马铃薯的经济效益分析

表 5 显示减量分施钾肥试验马铃薯的经济效益。

高肥力土壤上,扣除成本后,100% K 处理净收益最高,达到 70 762.85 元·hm⁻²,其他处理收益减少 2.50% ~ 29.04%;从净收益和节本增效综合来看,90% K(30% + 60%)处理、90% K(40% + 50%)处理和 70% K(20% + 50%)处理也较优,虽然净收益略低于 100% K 处理,但减少在 5%内。低肥力土壤上,扣除成本后,90% K(30% + 60%)处理和 70% K(20% + 50%)处理净收益较高,分别达到 41 164.43 元·hm⁻²和 40 898.16 元·hm⁻²,比 100% K 处理高 3.87%和 3.20%;90% K(40% + 50%)处理产量虽没有 100% K 处理高,但其净收益却高 137.69 元·hm⁻²。

高、低肥力土壤施钾处理的马铃薯净收益差异较大,高肥力土壤为 58 071.77 ~ 70 762.85 元·hm⁻²,低肥力土壤为 37 250.00 ~ 41 164.43 元·hm⁻²。

2.4 减量分施钾肥对马铃薯钾肥利用效率的影响

表 6 显示在高、低肥力土壤上减量分施钾肥对马铃薯钾肥利用率、钾肥农学效率、钾肥偏生产力、钾素经济学利用效率和生物学利用效率的影响。

高肥力土壤各处理马铃薯的生物量、K 量、钾肥利用率、钾肥农学效率和钾肥偏生产力与低肥力土壤有较大差异,高肥力土壤各施钾处理的总 K 量为 132.47 ~ 161.71 kg·hm⁻²,K 肥利用率为 22.18% ~ 36.84%,钾肥农学效率为 28.54 ~ 58.11 kg·kg⁻¹,钾肥偏生产力 164.14 ~ 222.22 kg·kg⁻¹;而低肥力土壤各个施钾处理的地上部和地下部总 K 量为 97.01 ~ 99.00 kg·hm⁻²,K 肥利用率为 13.05% ~ 26.57%,钾肥农学效率为 18.28 ~ 38.15 kg·kg⁻¹,钾肥偏生产力 94.95 ~ 138.13 kg·kg⁻¹。

高肥力土壤上,100% K 处理地下和地上部分干重是所有处理中最重的,K 量也最高,CK 处理的地上、地下干重和 K 量均所有处理中最低。低肥力土壤上,90% K(30% + 60%)处理和 70% K(20% + 50%)处理的地下部分干重较重,地下部分 K 量也较高;100% K 处理地上部分干重是所有处理中最重的,地上部分 K 量也最高。

无论是高肥力土壤还是低肥力土壤,钾肥利用率、钾肥农学效率和钾肥偏生产力最高的处理均是 70% K(20% + 50%)处理,钾肥利用率和钾肥农学效率最低的处理为 70% K 处理,钾肥偏生产力最低处理为 100% K 处理;钾素经济学利用效率和生物学利用效率均是 CK 处理最高。

表 5 各处理马铃薯的经济效益

Table 5 Profit of potato with different treatments

试验 Trials	处理 Treatment	产量 Yield /(kg· hm ⁻²)	产值 Value /(yuan· hm ⁻²)	成本 Cost /(yuan· hm ⁻²)	净收益 Net earning /(yuan· hm ⁻²)	相比 CK Compared with CK		相比 100% K Compared with 100% K		施钾效益 增加量 Increasing benefit by K /(yuan·hm ⁻²)
						/(yuan·hm ⁻²)	/%	/(yuan·hm ⁻²)	/%	
高肥力 High fertility plot	CK	20677.78	51694.44	1478.26	50216.18	—	—	-20546.67	-29.04	—
	100% K	29544.44	73861.11	3098.26	70762.85	20546.67	40.92	—	—	20546.67
	90% K	27043.06	67607.64	2936.26	64671.38	14455.20	28.79	-6091.47	-8.61	14455.2
	70% K	24273.61	60684.03	2612.26	58071.77	7855.59	15.64	-12691.08	-17.93	7855.59
	90% K(40% + 50%)	28611.11	71527.78	2936.26	68591.52	18375.34	36.59	-2171.33	-3.07	18375.34
	70% K(30% + 40%)	27137.50	67843.75	2612.26	65231.49	15015.31	29.90	-5531.36	-7.82	15015.31
	90% K(30% + 60%)	28770.83	71927.08	2936.26	68990.82	18774.64	37.39	-1772.03	-2.50	18774.64
	70% K(20% + 50%)	28000.00	70000.00	2612.26	67387.74	17171.56	34.20	-3375.11	-4.77	17171.56
低肥力 Low fertility plot	CK	12597.22	31493.06	1478.26	30014.79	—	—	-9616.12	-24.26	—
	100% K	17091.67	42729.17	3098.26	39630.91	9616.12	32.04	—	—	9616.11
	90% K	15836.11	39590.28	2936.26	36654.02	6639.23	22.12	-2976.89	-7.51	6639.22
	70% K	14900.00	37250.00	2612.26	34637.74	4622.95	15.40	-4993.17	-12.60	4622.94
	90% K(40% + 50%)	17081.94	42704.86	2936.26	39768.60	9753.81	32.50	137.69	0.35	9753.8
	70% K(30% + 40%)	16408.33	41020.83	2612.26	38408.57	8393.78	27.97	-1222.34	-3.08	8393.77
	90% K(30% + 60%)	17640.28	44100.69	2936.26	41164.43	11149.64	37.15	1533.52	3.87	11149.63
	70% K(20% + 50%)	17404.17	43510.42	2612.26	40898.16	10883.37	36.26	1267.25	3.20	10883.36

注:马铃薯 2.50 元·kg⁻¹;尿素 2.50 元·kg⁻¹;普钙 1.00 元·kg⁻¹;硫酸钾 4.50 元·kg⁻¹。

Note: Potato 2.50 yuan·kg⁻¹; Urea 2.50 yuan·kg⁻¹; SSP 1.00 yuan·kg⁻¹; K₂SO₄ 4.50 yuan·kg⁻¹.

表 6 不同处理马铃薯的 K 肥利用效率

Table 6 Potato K use efficiency of different treatments

试验 Trials	处理 Treatment	地上部分 Aboveground part		地下部分 Underground part		钾肥利 用率 KUE /%	钾肥农学 效率 KAUE /(kg·kg ⁻¹)	钾肥偏 生产力 KPFP /(kg·kg ⁻¹)	钾素经济学 利用效率 KEUE /(kg·kg ⁻¹)	钾素生物学 利用效率 KBUE /(kg·kg ⁻¹)
		干重	K 量	干重	K 量					
		Dry weight /(kg·hm ⁻²)	K content /(kg·hm ⁻²)	Dry weight /(kg·hm ⁻²)	K content /(kg·hm ⁻²)					
高肥力 High fertility plot	CK	356.28	9.62	5583.00	94.91	—	—	—	53.41	62.58
	100% K	599.67	17.33	7977.00	144.38	31.77	49.26	164.14	49.33	59.40
	90% K	565.06	16.27	7301.63	131.43	26.65	39.29	166.93	49.44	59.85
	70% K	543.28	15.16	6553.88	117.31	22.18	28.54	192.65	49.47	60.50
	90% K (40% + 50%)	548.72	15.58	7725.00	139.05	30.93	48.97	176.61	49.96	59.50
	70% K (30% + 40%)	546.78	16.13	7327.13	129.69	32.77	51.27	215.38	50.25	60.71
	90% K (30% + 60%)	551.83	16.00	7768.13	139.83	31.67	49.96	177.60	49.85	59.50
	70% K (20% + 50%)	564.67	16.38	7560.00	134.57	36.84	58.11	222.22	50.08	60.38
低肥力 Low fertility plot	CK	260.67	5.24	3653.19	60.28	—	—	—	55.76	64.93
	100% K	281.00	6.80	4956.58	90.21	17.49	24.97	94.95	51.09	58.06
	90% K	270.67	6.44	4592.47	82.66	14.56	19.99	97.75	51.54	58.83
	70% K	270.00	6.35	4321.00	75.62	13.05	18.28	118.25	52.71	60.71
	90% K (40% + 50%)	274.00	6.52	4953.76	87.68	17.71	27.68	105.44	52.59	59.62
	70% K (30% + 40%)	279.00	6.70	4758.42	88.98	23.94	30.25	130.22	49.73	56.61
	90% K (30% + 60%)	279.67	6.74	5115.68	91.57	20.24	31.13	108.89	52.04	58.92
	70% K (20% + 50%)	278.00	6.64	5047.21	92.36	26.57	38.15	138.13	50.98	57.66

3 讨论

钾是马铃薯生长过程中需要量较大的矿质营养元素,确定合理的钾肥施用量和施用方法是提高马铃薯钾肥利用率、实现节本增效的关键^[20]。有研究表明在马铃薯种植中钾肥一次性基施效果较好,追肥效果差,认为早施钾肥能够增强植株抗病力,提高大中薯比例,降低烂薯率,块茎大、商品性好^[21-22];而有研究表明在马铃薯不同生育期追施钾肥增产效果明显^[23-25],追肥时期一般在现蕾初期最佳,此时追肥可提高马铃薯生育后期叶绿素含量、光合强度,延缓衰老,提高块茎产量和淀粉含量,提高块茎商品率^[23-24]。

该试验分别在云南省马铃薯主产区同一地方的高、低肥力土壤上开展,试验结果显示,无论在高肥力还是低肥力土壤上,钾肥对马铃薯生长有重大影响,无钾肥处理马铃薯产量和钾利用效率均是所有处理中最差的,施钾处理均优于无钾处理;高肥力土壤和低肥力土壤上的相同处理相比,马铃薯产量、经济效益、钾肥利用率、钾肥农学效率和钾肥偏生产力等均有较大差异。

在高、低产田的一次性施钾肥的 100% K、90% K 和 70% K 三个处理中,100% K 处理均是产量和净收益最好的处理。这与该试验的目的是为研究马铃薯种植中钾肥的减量高效,试验设置的肥料用量属于生产实践中中等偏低的用 K 肥量有关,一次施用 K 肥处理的产量收益随着用 K 肥量的增加而增加。

减量分施钾肥的 90% K(40% + 50%)、70% K(30% + 40%)、90% K(30% + 60%) 和 70% K(20% + 50%) 四个处理中,在高、低产田中均是 90% K(30% + 60%) 处理产量和收益最高,70% K(20% + 50%) 处理的钾肥利用率、钾肥农学效率和钾肥偏生产力最高。在施用钾肥量相同时,后期多施钾肥的 90% K(30% + 60%) 处理和 70% K(20% + 50%) 处理的产量、收益和钾肥效益等均分别高于分次施用 K 肥的 90% K(40% + 50%) 处理和 70% K(30% + 40%) 处理。

在高肥力土壤上,100% K 处理(常规施钾肥)的马铃薯产量是最高的,这也是当地农户在马铃薯种植中均为一次性基施钾肥的重要原因之一。高产田地的高产是靠高养分供给来支撑,K 肥减量分施处理虽然减少了马铃薯的产量,但 90% K(30% + 60%) 处理产量与 100% K 处理产量并没有显著性差异,可见在高肥力土壤上,如果不一味追求高产,可通过钾肥的减量分施来实现马铃薯经济效益提高

和环境效益优化。

在低肥力土壤上,90% K(40% + 50%) 处理和 70% K(20% + 50%) 处理是产量较高收益较好的两个处理,产量收益均高于 100% K 处理(常规施钾肥),因此在马铃薯产量并不低的低肥力土壤上,合理施用钾肥的方式作用更突出,K 肥减量而后期多施的处理更可以实现优质高产,获得高的经济效益和肥料利用率。

该试验土壤为云南省典型雨养农业区的山原红壤坡耕旱地,年降水量 800 mm,其中 80% 以上都集中在雨季(6月—9月),此时正好是马铃薯生长的中期和后期,钾素容易流失,虽然流失量不算大,但是这些流失的钾素正是作物可以直接利用的水溶性钾素,来源于施肥和表层土壤中^[26-28]。钾素流失可能是导致高低肥力不同土壤上的马铃薯有不同的施肥效果的原因之一:在高肥力土壤上,其基础肥力水平高,保水保肥能力强,土壤中钾素流失少,在马铃薯大量需要钾肥的中后期仍然可以正常保证钾素的供给,使马铃薯正常生长;在低肥力土壤上,基础肥力水平低,保水保肥能力弱,在雨季中土壤钾素流失相对较多,虽然 100% K 一次性施用处理的钾肥用量最多,但由于其流失多,在马铃薯需要大量钾素的中后期不能保证钾素的供应,而钾肥后期多施的处理虽然用钾量稍低,但其流失较少,其施用时期正好供给马铃薯中后期生长所用,所以在低肥力土壤上,钾肥施用时期后移的 90% K(30% + 60%) 处理和 70% K(20% + 50%) 处理产量均高于 100% 的常规施肥。

4 结论

在该地区,通过试验比较,高肥力土壤上 90% K(30% + 60%) 处理和低肥力土壤上 90% K(30% + 60%) 处理、70% K(20% + 50%) 处理的产量、收益和钾肥利用率高,可获得较好的经济效益和环境效益,达到节本增效的目的,所以在云南省当地马铃薯旱地种植中,高肥力土壤上推荐施用 K_2O 总量 $162 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,低肥力土壤上推荐施用 K_2O 总量 $126 \sim 162 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,两种肥力地块上钾肥施用比例均为苗期 30%、现蕾期 70%。

参考文献:

- [1] 陆景陵.植物营养学[M].北京:中国农业大学出版社,1994.
- [2] 慕成功.钾素营养及施肥技术[M].北京:中国农业科技出版社,1995.
- [3] R D 芒森.农业中的钾[M].北京:科学出版社,1995.

- ation of permanent raised beds, no tillage and strawmulching for an irrigated maize-wheat system in Northwest India [J]. *Expl Agric*, 2012, 48(1):21-38.
- [34] 李全起,陈雨海,吴巍,等. 秸秆覆盖和灌溉对冬小麦农田光能利用率的影响[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(2):243-246.
- [35] 李素娟,李琳,陈阜,等. 保护性耕作对华北平原冬小麦水分利用的影响[J]. *华北农学报*, 2007, 22(S1):115-120.
- [36] 刘婷,贾志宽,张睿,等. 秸秆覆盖对旱地土壤水分及冬小麦水分利用效率的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(7):68-76.
- [37] Dahiya R, ngwersen J, Streck T. The effect of mulching and tillage on the water and temperature regimes of a loess soil: Experimental findings and modeling[J]. *Soil Tillage Res*, 2007, 96(1/2):52-63.
- [38] Sarkar S, Paramanick M, Goswami S. Soil temperature, water use and yield of yellow sarson (*brassica napus* L. Var. *Glauca*) in relation to tillage intensity and mulch management underrainfed lowland ecosystem in eastern India[J]. *Soil and Till - age Research*, 2007, 93(1):94-101.
- [39] 刘炜,高亚军,杨君林,等. 旱地冬小麦返青前秸秆覆盖的土壤温度效应[J]. *干旱地区农业研究*, 2007, 2(4):197-201.
- [40] Martinez F, Lazo Y O, Fernandez-Galiano J M, et al. Root respiration and associated costs in deciduous and evergreen species of *Quercus*[J]. *Plant Cell Environ*, 2002, 25(10):1271-1278.
- [41] Peng S B, Huang J L, Sheehy J E, et al. Rice yields decline with higher night temperature from global warming[J]. *Proc Natl Acad Sci*, 2004, 10(27):9971-9975.
- [42] Leea S H, Adya P S, Gap C C, et al. Exposure of roots of cucumber (*Cucumis sativus*) to low temperature severely reduces root pressure, hydraulic conductivity and active transport of nutrients[J]. *Physiologia Plantarum*, 2004, 120(3):413-420.
- [43] Burton A J, Melillo J M, Frey S D. Adjustment of forest ecosystem root respiration as temperature warms[J]. *J Int Plant Biol*, 2008, 50(11):1467-1483.
- [44] Walker J M. One degree increments in soil temperatures affect maize seedling behavior[J]. *Pro Soc Soil Sci Am*, 1969, 33(5):729-736.
- [45] 高丽娜,陈素英,张喜英,等. 华北平原冬小麦麦田覆盖对土壤温度和生育进程的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(1):107-114.
- [46] 张俊鹏,刘组贵,孙景升,等. 不同水分和覆盖处理对冬小麦生长及水分利用的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2015, 34(8):7-11.
- [47] 张海林,陈阜,秦耀东,等. 覆盖免耕夏玉米耗水特性的研究[J]. *农业工程学报*, 2002, 18(2):36-40.
- [48] 陈素英,张喜英,裴冬,等. 秸秆覆盖对夏玉米田棵间蒸发和土壤温度的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2004, 23(4):32-36.
- [49] Besky A J. Does herbivory benefit plants? A review of the evidence[J]. *Am Nat*, 1986, 127(6):870-892.
- [50] Gajri P R, Prihar S S. Effect of small irrigation amounts on the yield of wheat[J]. *Agric Water Manag*, 1983, 6(1):31-41.

(上接第 7 页)

- [4] P M 哈里斯. 马铃薯改良的科学基础[M]. 北京:农业出版社, 1984:155-185.
- [5] 2015 年云南省统计年鉴[M]. 北京:中国农业出版社, 2011.
- [6] 孔令郁,彭启双,熊艳,等. 平衡施肥对马铃薯产量及品质的影响[J]. *土壤肥料*, 2004, (3):17-19.
- [7] 陈洪,张新明,全锋,等. 氮磷钾不同配比对冬作马铃薯产量、效益和肥料利用率的影响[J]. *中国马铃薯*, 2010, 24(4):224-229.
- [8] 王国兴,徐福利,王渭玲,等. 氮磷钾及有机肥对马铃薯生长发育和干物质积累的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2013, 31(3):106-111.
- [9] 赵欢,芍久兰,何佳芳,等. 钾肥对马铃薯干物质积累、钾素吸收及利用效率的影响[J]. *西南农业学报*, 2015, 28(2):644-649.
- [10] 张东昱,王多成,张荣,等. 钾肥对鲜食型马铃薯产量及品质的影响[J]. *中国马铃薯*, 2009, 23(3):152-154.
- [11] 殷文,孙春明,马晓燕,等. 钾肥不同用量对马铃薯产量及品质的效应[J]. *土壤肥料*, 2005, (4):44-47.
- [12] 芍久兰,孙锐锋,袁玲. 马铃薯钾素营养研究进展[J]. *贵州农业科学*, 2009, 37(9):54-56.
- [13] 弓钦,樊明寿. 马铃薯测土配方施肥技术[M]. 北京:中国农业出版社, 2011.
- [14] 穆俊祥,曹兴明,弓建国. 氮磷钾和有机肥配合施用对马铃薯淀粉含量和产量的影响[J]. *土壤*, 2009, 41(5):844-848.
- [15] Westermann D T, Tindall T A. Potassium diagnostic criteria for potato plants[J]. *Better Crop*, 2000, 84(3):6-8.
- [16] 康文钦,石晓华,敖孟奇,等. 马铃薯的钾素需求及营养诊断[J]. *中国土壤与肥料*, 2013, (2):1-4.
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社, 2000:127-129, 146-149, 302-311.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京:中国农业出版社, 2005.
- [19] 劳家怪. 土壤农化分析手册[M]. 北京:农业出版社, 1988.
- [20] 刘润梅,范茂攀,付云章,等. 云南省马铃薯施肥量与化肥偏生产力的关系研究[J]. *土壤学报*, 2014, 51(4):753-760.
- [21] 段玉,张君,王博,等. 钾肥品种和施钾时期对马铃薯产量和品质的影响[J]. *北方农业学报*, 2016, 44(2):1-6.
- [22] 蒋富友,杨永泉. 不同时期施用钾肥对脱毒马铃薯产量的影响[J]. *中国马铃薯*, 2006, 20(5):280-281.
- [23] 张琼,屠年忠,董云忠. 马铃薯不同生育时期追施钾肥增产效果分析[J]. *云南农业*, 2009, (2):32-33.
- [24] 郭志平. 马铃薯不同生育期追施钾肥增产效果的研究[J]. *土壤肥料*, 2002, (3):15-20.
- [25] 魏红,孙国梁,李霞,等. 钾肥不同施用次数对马铃薯农艺性状及产量的影响[J]. *内蒙古农业科技*, 2015, 43(6):41-42.
- [26] 朱青,王兆鸾,陈正刚,等. 中国西南地区坡地钾素平衡及管理措施探讨[J]. *中国植物营养与肥料学报*, 2006, 12(6):772-777.
- [27] 袁东海,王兆鸾,郭新波,等. 红壤小流域不同利用方式土壤钾素流失特征研究[J]. *水土保持通报*, 2003, 23(3):16-20.
- [28] 刘建香,贾秋鸿,田树,等. 不同农艺措施对云南红壤坡耕地钾素平衡和流失的影响[J]. *西南农业学报*, 2009, 22(4):1006-1010.