植物营养与肥料学报 2014,20(1):56-63
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2014.0107

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

张水清[1], 黄绍敏[1*], 聂胜委[1], 郭斗斗[1], 林 杉[2]
(1 河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所, 河南郑州 450002; 2 华中农业大学资源与环境学院, 湖北武汉 430070)

摘要: 以长期定位试验为平台,夏玉米品种郑单136为材料,设置CK(不施肥),NP(施氮、磷肥),NPK(施氮、磷、钾肥)和1.5MNPK(小麦季施高量氮、磷、钾肥+有机肥,玉米季仅施用化肥)4个处理,研究夏玉米钾素吸收规律及生育期内土壤钾素动态变化。结果表明,生育期内施钾与不施钾处理夏玉米干物质积累量均一直增加,在成熟期达到最大值;在施用氮、磷肥的基础上增施钾肥不但可以提高夏玉米地上部干物质积累量,同时也可以提高叶片及茎秆中的钾素含量,进而提高夏玉米整个地上部吸钾量;而在氮、磷、钾肥基础上增施有机肥,对夏玉米干物质积累无显著影响,但可显著提高茎秆及叶片的钾素含量和地上部钾素吸收总量。夏玉米钾素吸收主要集中在灌浆期之前,在灌浆期达到最大值,之后钾素出现回流现象。夏玉米收获后与播种前相比,土壤水溶性钾和交换性钾含量无明显下降或者略有增加,而非交换性钾明显下降,非交换性钾是夏玉米钾素吸收的主要形式。夏玉米吸钾量与播种前土壤3种形态的钾素含量呈显著正相关。因此,增施钾肥对于改善夏玉米生产,维持土壤钾素平衡及实现农业可持续发展具有深远意义。

关键词: 长期定位施肥; 夏玉米; 吸钾量; 水溶性钾; 交换性钾; 非交换性钾
中图分类号: S513.01; S153.6+1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2014)01-0056-08

Effects of long-term fertilization on potassium uptake of summer maize and potassium dynamics of fluvo-aquic soil

ZHANG Shui-qing[1], HUANG Shao-min[1*], NIE Sheng-wei[1], GUO Dou-dou[1], LIN Shan[2]
(*1 Institute of Plant Nutrition and Environmental Resources Science, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China; 2 College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China*)

Abstract: Long-term (over 20 years) fertilization experiments were conducted to study potassium (K) uptake of summer maize and potassium dynamics of fluvo-aquic soil in Zhengzhou of China. The study consisted of four treatments, CK (no fertilizer or manure), NP (nitrogen and phosphorus fertilizer applied), NPK (nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer applied) and 1.5MNPK (nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer and manure applied in winter wheat season, only chemical fertilizer applied in summer maize season). The results show that both in the treatments with K and without K, the dry matter accumulation amounts are constantly increased with maize growing, and the maximum values are at the maturity stage of summer maize. The K concentrations in leaves and stalks and K uptakes of summer maize are increased significantly by adding K fertilizer on the basis of applying nitrogen and phosphorus. However, by adding manure on the basis of applying nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer (NPK), the dry matter accumulation of summer maize is not greatly affected, but the K concentrations in leaves and stalks and K uptake are increased significantly. The maximum K uptakes occur at the filling stage of

收稿日期: 2013-05-21 **接收日期:** 2013-11-04
基金项目: 国家公益性行业(农业)科研专项经费项目(201203030-5); 国家基础研究发展计划"973"项目(2011CB100501); 国家"十二五"粮食丰产科技工程课题(2011BAD16B15); 国家自然科学基金(31301284,41201255)资助。
作者简介: 张水清(1982—), 男, 河南南阳人, 硕士, 助理研究员, 主要从事作物施肥与土壤肥力研究。E-mail: zsq510@163.com
* 通信作者 E-mail: hsm503@126.com

summer maize in all the treatments and after that, backflow phenomenon is occurred. Compared with the soil K contents before maize seeding, the water soluble K and exchangeable K are declined or ascended slightly after the harvest, while the non-exchangeable K of fluvo-aquic soil is declined significantly. The non-exchangeable K is the main form for K uptake of maize. K uptake of summer maize has significant positive correlations with the three forms of K contents in the soil. Therefore, potassium fertilization is of far-reaching significance in improving the maize production, maintaining balance of soil potassium and realizing sustainable development of agriculture.

Key words: long-term fertilization; summer maize; K uptake; water soluble K; exchangeable K; non-exchangeable K

钾是玉米生长必需的营养元素之一,在玉米光合作用、蛋白质合成、物质运输及抗逆等方面起重要作用[1],玉米对钾素的吸收、利用直接影响到这些生理作用,并最终影响玉米产量及品质[2-4]。因此,急需研究玉米钾素吸收规律,掌握科学施钾技术,进而通过有效调控措施提高玉米产量,改善玉米品质。何萍等[5-6]研究发现,施钾在提高玉米产量的同时,增加了子粒中脂肪和蛋白质及其组分含量,但减少了淀粉总量和支链淀粉含量;在玉米生长前期钾素吸收较快,到灌浆期已积累了总量的82.8%～95.5%,此后仅有少量吸收。尽管有关玉米钾素吸收、利用、分配方面的研究报道较多[7-9],但将其与土壤钾素的动态变化结合起来,并研究两者之间关系的报道甚少,且主要在短期的试验研究上,所得的结论仍需进一步的研究与验证。长期试验可以弥补这方面的不足,具有时间上的长期性和气候上的代表性等特点,其信息量充足,准确可靠,具有短期试验不可比拟的优点[10]。本研究以此为切入点,以国家潮土土壤肥力与肥料效益长期监测基地为平台,研究长期定位施肥对夏玉米干物质生产、钾素吸收及对潮土土壤不同形态钾素动态变化的影响,以及二者之间的关系,旨在为河南及周边潮土区夏玉米钾肥管理提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验在国家潮土土壤肥力与肥料效益长期监测基地进行,基地原址位于河南省郑州市(N34°47′和E113°40′)。建于1987年,经过两年匀地种植,从1990年秋季开始,进行不同施肥结构和种植制度下(小麦—玉米和小麦—大豆轮作)的作物产量与土壤肥力和肥料效益长期定位监测试验。供试土壤为砂壤质潮土,成土母质为黄河冲积物,土壤有机质含量10.6 g/kg,全氮1.01 g/kg,全磷0.65 g/kg,全钾16.9 g/kg,碱解氮76.6 mg/kg,有效磷21.2 mg/kg,速效钾71.7 mg/kg,pH 8.1。试验地于2009年5月采用原状土搬迁方式移至河南省原阳县祝楼乡,位于原试验地正北约23 km处。

1.2　材料与试验设计

供试夏玉米品种为郑单136,由河南省农科院粮食所提供。

试验共设4个处理:1)不施肥(CK);2)施氮、磷肥,不施钾肥(NP);3)施氮、磷、钾肥(NPK);4)小麦季施氮磷钾肥+有机肥,玉米季仅施用化肥(1.5MNPK),每个处理重复3次,试验小区面积43 m^2,施肥量从1990年至今一直保持不变,各处理施肥量见表1。

夏玉米于2012年6月8日播种,播量约35 kg/hm^2,行距60 cm,2012年10月4日收获。试验田按大田试验要求进行管理,于苗期、大喇叭口期各浇水1次,灌水量500 m^3/hm^2,并在必要时进行人工除草。氮、磷、钾肥分别用尿素、过磷酸钙和氯化钾,磷肥与钾肥于苗期(播种后16 d)一次施入,氮肥于苗期和喇叭口期各50%分两次施入。全生育期共取样4次,分别为苗期(播种后15 d)、大喇叭口期(播种后45 d)、灌浆期(播种后75 d)、成熟期(播种后110 d)。

1.3　测定项目与方法

1.3.1 地上部干物质积累量　在玉米上述各生育期取3株植株样品,用自来水冲洗干净,剪去根部,分为茎秆、叶片、穗轴和籽粒(苗期为整株,大喇叭口期为叶片和茎秆),鲜样于105℃杀青30 min,70℃烘干至恒重,称重。

1.3.2 钾含量测定　植株样品全钾采用 H_2SO_4-H_2O_2 消化—火焰光度法测定。土壤交换性钾采用乙酸铵提取、水溶性钾用去离子水提取、非交换性

表1 试验处理及施肥量(kg/hm²)

Table 1 Application rates of fertilizers in different treatments

处理 Treatment	当季玉米化肥用量 Application rates of fertilizers in maize season			上季小麦化肥用量 Application rates of fertilizers in last wheat season			上季小麦有机肥养分量 Application rates of manure in last wheat season		
	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O
CK	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NP	187.5	93.8	0	165.0	82.5	0	0	0	0
NPK	187.5	93.8	93.8	165.0	82.5	82.5	0	0	0
1.5 MNPK	281.3	140.6	140.6	74.3	123.8	123.8	173.2	273.8	96.5

钾用硝酸提取后,均用火焰光度法测定。

植株各器官吸钾量(kg/hm²)=各器官干物质积累量(kg/hm²)×各器官中全钾含量(%)。

1.3.3 数据处理 试验数据用 Excel 2007 整理与作图,用 SPSS 17.0 进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 长期定位施肥对夏玉米钾素吸收积累的影响

2.1.1 夏玉米干物质积累量的变化 地上部干物质积累量是决定夏玉米产量高低的物质基础。由图1可以看出,所有处理干物质积累量均随夏玉米的生长不断增加,在成熟期达到最大值;NPK 与 1.5MNPK 处理的干物质积累量在各生育期均无显著差异,但显著高于 NP 和 CK 处理。可以看出,施钾可以提高夏玉米地上部干物质积累量,但增施有机肥对干物质积累无显著影响。

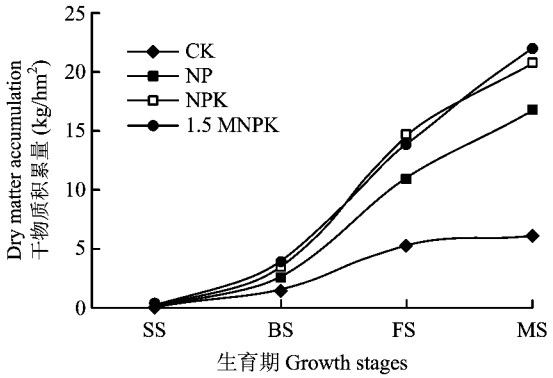

图1 长期定位施肥对夏玉米地上部干物质积累量的影响

Fig.1 Effects of long-term fertilization on aboveground dry matter accumulation of summer maize

[注(Note): SS—苗期 Seeding stage; BS—大喇叭口期 Bell stage; FS—灌浆期 Filling stage; MS—成熟期 Maturity stage.]

2.1.2 夏玉米不同生育期各器官全钾含量 夏玉米不同生育期和各器官钾含量(表2)显示,所有处理的玉米叶片中钾素含量在大喇叭口期之后均呈逐渐降低趋势;茎秆中钾素含量在大喇叭口期较高,到灌浆期剧烈下降,到成熟期又略有升高;由于生育后期钾素在玉米营养体内的再分配,穗轴和籽粒在成熟期钾素含量均低于灌浆期。成熟期玉米穗轴与籽粒中的钾素含量均低于叶片和茎秆,说明叶片和茎秆是储存钾素的主要器官。

在成熟期,各处理玉米籽粒的钾素含量为0.16%~0.18%,施肥对于籽粒中钾含量影响较小,处理之间无显著差异,灌浆期籽粒中钾含量高于成熟期,其主要原因可能是灌浆期干物质积累量较小,在成熟期大量干物质积累之后,钾素被稀释,导致成熟期籽粒钾含量较低。而茎秆中的钾素含量为0.27%~2.63%,相差9.7倍,NPK 处理在各个时期的茎秆钾素含量均显著高于 NP 处理,而低于有机肥处理。叶片中的钾素含量为0.31%~1.16%,相差3.7倍,各个时期的叶片钾素含量 NPK 处理均显著高于 NP 处理。这可以看出,增施钾肥可以显著提高叶片和茎秆中的钾素含量,而对籽粒和穗轴中钾素含量的影响较小,在植株缺钾情况下,叶片和茎秆中的钾素可以向生殖器官转移,首先保证其籽粒中的钾素含量。

2.1.3 长期定位施肥对夏玉米钾素吸收量的影响 由图2可以看出,所有处理夏玉米地上部吸钾量从苗期至灌浆期一直呈增加趋势,至灌浆期达到最大值,1.5MNPK 处理最高,为160.6 kg/hm²,之后略有降低,在整个生育期中呈"低—高—低"单峰曲线变化。所有处理从灌浆期开始至成熟期钾素开始外排,吸钾总量降低,钾素外排量为1.2 kg/hm²~18.5 kg/hm²。说明夏玉米的钾素吸收主要在生育前期完成。不施钾肥处理(CK 和 NP)钾素的吸收

表 2　长期定位施肥对夏玉米不同器官钾素含量的影响(%)

Table 2　Effects of long-term fertilization on potassium concentrations in different organs of summer maize

器官 Organ	处理 Treatment	苗期 Seeding stage	大喇叭口期 Bell stage	灌浆期 Filling stage	成熟期 Maturity stage
整株 Whole plant	CK	1.08 ±0.19 b			
	NP	1.23 ±0.16 b			
	NPK	1.38 ±0.20 b			
	1.5MNPK	2.92 ±0.18 a			
叶片 Leaf	CK		1.13 ±0.11 b	0.82 ±0.05 b	0.50 ±0.14 c
	NP		0.50 ±0.03 c	0.45 ±0.03 c	0.31 ±0.12 c
	NPK		1.41 ±0.11 b	1.05 ±0.16 ab	0.85 ±0.06 b
	1.5MNPK		2.28 ±0.08 a	1.79 ±0.61 a	1.13 ±0.09 a
茎秆 Stalk	CK		1.05 ±0.12 c	0.61 ±0.16 c	1.03 ±0.19 b
	NP		0.39 ±0.17 d	0.39 ±0.06 c	0.27 ±0.07 c
	NPK		1.87 ±1.14 b	1.07 ±0.31 b	1.28 ±0.33 b
	1.5MNPK		3.38 ±0.18 a	2.19 ±0.30 a	2.28 ±0.51 a
籽粒 Grain	CK			0.29 ±0.03 a	0.16 ±0.02 a
	NP			0.25 ±0.01 a	0.17 ±0.01 a
	NPK			0.26 ±0.02 a	0.18 ±0.01 a
	1.5MNPK			0.26 ±0.01 a	0.18 ±0.01 a
穗轴 Ear axis	CK			1.08 ±0.10 a	0.58 ±0.07 a
	NP			0.57 ±0.04 b	0.57 ±0.11 a
	NPK			0.71 ±0.08 ab	0.67 ±0.03 a
	1.5MNPK			0.89 ±0.06 a	0.61 ±0.08 a

注(Note):同列数据后不同字母表示同一器官在同一时期不同处理之间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant different among the different treatments in same organ and same growth stage at the 5% level.

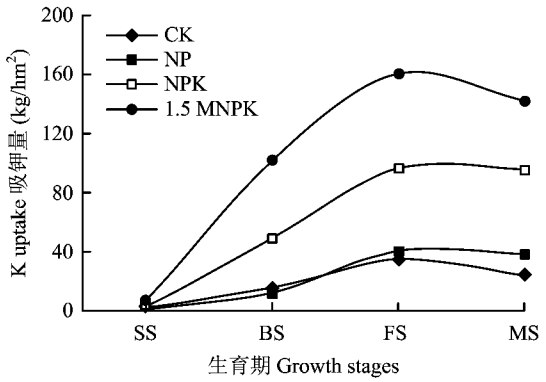

图 2　长期定位施肥对夏玉米钾素吸收积累的影响

Fig. 2　Effects of long-term fertilization on K uptake of summer maize

[注(Note):SS—苗期 Seeding stage; BS—大喇叭口期 Bell stage; FS—灌浆期 Filling stage; MS—成熟期 Maturity stage.]

量整个生育期明显低于其他处理,在成熟期钾素吸收总量仅为 24.4 kg/hm² 和 38.3 kg/hm²,分别为 NPK 处理的 25.6% 和 40.0%。1.5MNPK 处理的玉米钾素吸收量显著高于 NPK 处理,而 NPK 处理玉米钾素吸收量显著高于 NP 和 CK 处理,说明增施钾肥可以显著提高作物钾素吸收量。

2.2　长期定位施肥条件下夏玉米不同生育期土壤钾素的动态变化

2.2.1 土壤水溶性钾的动态变化　不同施肥处理,在夏玉米不同生育时期呈现不同的土壤水溶性钾变化趋势(图3)。长期不施钾肥处理(CK 和 NP)的土壤水溶性钾一直稳定在 6～9 mg/kg,变化不大。说明本试验条件下土壤水溶性钾含量降低至一定程度后不再降低,作物吸收水溶性钾后,可能由其他形态

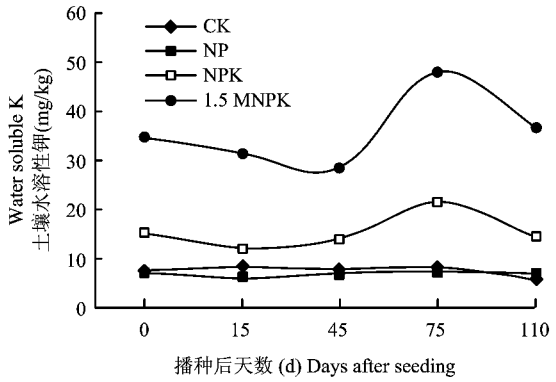

图3 土壤水溶性钾动态变化

Fig. 3 Dynamics of soil water soluble K at different growth stages of summer maize

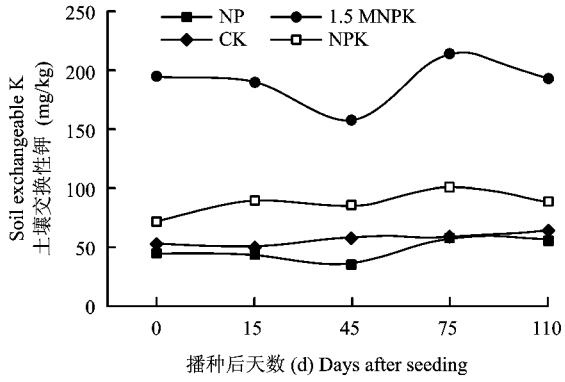

图4 土壤交换性钾动态变化

Fig. 4 Dynamics of soil exchangeable K at different growth stages of summer maize

的钾素向水溶性钾转化。在夏玉米播种后15 d(苗期),施钾处理的土壤水溶性钾均比试验初期略有下降,到播种后75 d(灌浆期)又逐渐增加,可以看出,施用钾肥可以增加土壤水溶性钾。灌浆期之后,由于夏玉米继续吸钾,土壤水溶性钾含量又有一定程度的下降。总体上看,在夏玉米成熟期4个处理的土壤水溶性钾与试验前期相比下降了 -2.2 ~ 5.8 mg/kg,但平均则上升了0.9 mg/kg,变化不大。

2.2.2 土壤交换性钾的动态变化 图4看出,1.5MNPK处理土壤交换性钾随着玉米的生长,变化幅度较大,从试验初期至播种后45 d(大喇叭口期)逐渐下降到整个生育期的最低点158.9 mg/kg,从大喇叭口期至灌浆期又逐渐增加,之后逐渐降低到试验初期水平。其他处理的土壤交换性钾含量在整个生育期波动较小,均呈缓慢增加趋势,说明施用钾肥可以提高土壤交换性钾含量。

2.2.3 土壤非交换性钾的动态变化 长期定位施肥对土壤非交换性钾含量有较为显著的影响,在试验初期,不同施肥处理的土壤非交换性钾含量为660 ~ 860 mg/kg(图5)。CK和NP处理的土壤非交换性钾随着夏玉米的生长逐渐下降,到成熟期分别比试验初期下降了65.5 mg/kg和59.0 mg/kg,下降幅度分别为9.4%和8.9%。而施用钾肥处理(NPK和1.5MNPK)土壤非交换性钾的变化趋势基本一致,由于夏玉米的吸钾均在播种后至播后15 d而呈略微下降趋势。而在播种后15 d至45 d呈逐渐上升趋势,主要原因是由于本试验在播种后16 d(苗期)施用钾肥,而钾肥在这一时期逐步被土壤所吸附固定,转化为土壤非交换性钾。在夏玉米播种后45 d(大喇叭口期)至75 d(灌浆期),土壤非交换性

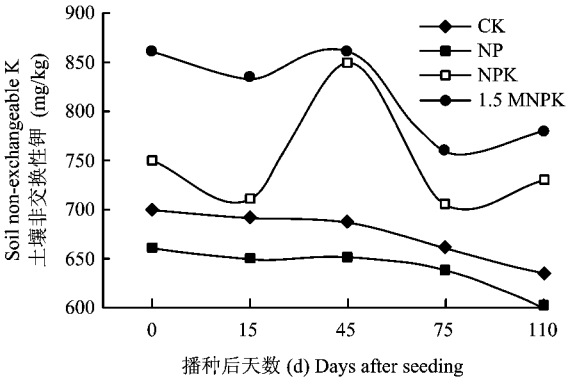

图5 土壤非交换性钾动态变化

Fig. 5 Dynamics of soil non-exchangeable K at different growth stages of summer maize

钾呈急剧下降趋势,下降了12.0% ~ 18.8%,夏玉米钾素吸收主要集中在这一时期,因此在这段时期土壤非交换性钾快速释放,转化为其他形态的钾,供夏玉米吸收利用。在大喇叭口期至灌浆期这2个施钾处理土壤交换性钾和水溶性钾分别上升15.8 ~ 54.6 mg/kg和4.0 ~ 19.9 mg/kg,土壤非交换钾下降了103.3 ~ 160.0 mg/kg,是前两种形态钾素升高的主要原因。

2.3 夏玉米吸钾量与土壤钾素的关系

夏玉米钾素吸收量不但受地上部干物质积累量的影响,还受土壤不同形态钾素含量的影响(表3)。夏玉米成熟期钾素吸收总量与播种前土壤水溶性钾、交换性钾和非交换性钾含量均呈极显著正相关,相关系数分别为0.766、0.799和0.706,说明夏玉米的总吸钾量的大小受土壤钾素含量高低的影响;但播种前相关系数高于收获后夏玉米吸钾量与

土壤钾素含量的相关系数(0.676～0.697)，说明夏玉米的吸钾量与播种前土壤钾素状况之间的关系更紧密。而收获后土壤水溶性钾、交换性钾和非交换性钾含量与夏玉米吸钾量呈极显著正相关，说明夏玉米的吸钾量对收获后土壤钾素含量有显著影响。而播种前和收获后土壤 3 种形态钾素之间也具有极显著的正相关关系，说明土壤几种形态钾素之间存在相互转化，受土壤吸附、解吸、固定等化学行为控制。

表 3　夏玉米吸钾量与土壤钾素含量相关性分析(r)

Table 3　Correlations between cumulative K uptake by summer maize and soil K content

时期 Period	钾素指标 K index	WSK	EK	NEK
播种前 Before seeding	WSK			
	EK	0.938**		
	NEK	0.941**	0.924**	
	KU	0.766**	0.799**	0.706**
收获后 After harvest	WSK			
	EK	0.970**		
	NEK	0.795**	0.820**	
	KU	0.676**	0.684**	0.697**

注(Note)：**—$P < 0.01$. WSK—水溶性钾 Water soluble K; EK—交换性钾 Exchangeable K; NEK—非交换性钾 Non-exchangeable K; KU—吸钾量 K uptake.

3　讨论与结论

本试验结果表明，施钾与不施钾处理夏玉米干物质积累量均随着玉米生长不断增加，在成熟期达到最大值，在施用氮、磷肥的基础上增施钾肥不但可以提高夏玉米地上部干物质积累量，同时可以提高叶片及茎秆中的钾素含量，进而提高夏玉米整个地上部的吸钾量；夏玉米钾素吸收主要集中在灌浆期之前，4 个处理在灌浆期之后出现钾素外排现象。王宜伦等[11-12]在本试验区周边潮土区进行相似试验发现，施钾能提高夏玉米产量 4.7%～14.4%，且能提高钾素积累量。赵尚文等[13]研究发现，玉米一生中吸收钾素量以抽雄开花期为最多，乳熟期因钾素外渗而表现为负吸收，玉米对钾素的吸收主要集中在生长发育前期；笔者在河南冬小麦上已证实，在生育后期存在钾素外排现象，外排的钾素量达 43.1～114.8 kg/hm^2[14]；不同学者在小麦[15]、玉米[13]、烟草[16]上均观测到钾素外排这一现象，但均是在短期试验中进行的，而本长期试验结果中更为精细地计算出夏玉米在灌浆期之后钾素外排 1.2～18.5 kg/hm^2，再次验证了作物生育期内钾素的外排现象。但目前对于作物钾素外排的机理研究较少，可能的原因是作物生长后期钾在植株中与有机物结合不牢固，衰老时容易外渗[17]或者钾素通过作物韧皮部由地上部向根部回流以及通过根系外排[16]。笔者认为，在灌浆期施用钾肥可以一定程度上阻止钾素外排，提高夏玉米钾素吸收量，从而改善玉米品质，但仍需要进一步研究。

无论作物体内钾素以何种形式外排，最终将回到土壤。本研究结果表明，在夏玉米生育后期，施钾土壤非交换性钾含量均呈增加趋势，成熟期土壤非交换性钾比灌浆期增加 22.2～36.7 mg/kg，而增加的这部分钾素可能是由于作物中的钾以 K^+ 形态进入土壤，后被土壤吸附固定，转化为非交换性钾。因此，作物钾素吸收量与土壤非交换性钾含量有着密切关系(表 3)。黄绍文等认为，土壤在钾素耗竭状态下，作物吸收的钾素有 33.3% 来自土壤非交换性钾，非交换性钾和速效钾的共同作用代表了土壤对作物当季的供钾能力[18]。土壤速效钾是作物直接吸收的主要形式，但本试验结果表明，夏玉米收获后与播种前相比，土壤水溶性钾和交换性钾含量无明显下降或者略有增加，这可能是由于土壤非交换性钾的释放的缘故。而在水分、温度等条件一致的条件下，非交换性钾的释放受作物根系、吸钾量以及土壤酸度等因素影响，不同类型土壤的非交换性钾释放差别也较大[19-20]。而本研究中不施钾肥处理土壤非交换性钾比播种前下降 60 mg/kg 左右，非交换性钾的释放是夏玉米钾素吸收的主要来源。

随着作物产量和氮、磷肥用量不断提高，作物从土壤中带走的钾量逐渐增加。杨学云等[21]在陕西连续 20 年长期定位试验中监测到小麦－玉米轮作体系下平均每年土壤钾素亏缺的量为 31～217 kg/hm^2；本长期试验以 NPK 处理计算，1991～2011 年共亏缺钾素 2071 kg/hm^2，每年亏缺纯钾 99 kg/hm^2；另有研究表明，在我国河北、山西和天津等地，作物每年带走钾素量为 165～189 kg/hm^2，而钾肥(按纯 K 计)施入量仅为 97～119 kg/hm^2，土壤钾素处于不断耗竭状态[22]。因此，增施钾肥对于提高我国玉米产量，维持土壤钾素平衡及实现农业可持续发展具有深远意义。

参考文献:

[1] 陆景陵. 植物营养学(上册)[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2003. 36-44.
Lu J L. Plant nutrition [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2003. 36-44.

[2] 谭德水, 金继运, 黄绍文. 长期施钾对东北春玉米产量和土壤钾素状况的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(10): 2234-2240.
Tan D S, Jin J Y, Huang S W. Effect of long-term application of K fertilizer on spring maize yield and soil K in Northeast China [J]. Sci. Agric. Sin., 2007, 40(10): 2234-2240.

[3] 曹敏建, 王淑琴, 张雨林, 等. 钾对玉米生长发育及生理指标影响的研究[J]. 土壤通报, 1994, 25(4): 181-183.
Cao M J, Wang S Q, Zhang Y L *et al*. Study on the growth, development and physiological characteristics of maize as influenced by potassium[J]. Chi. J. Soil Sci., 1994, 25(4): 181-183.

[4] 阴卫军, 刘强, 张李娜, 等. 施钾时期和施钾量对不同淀粉含量玉米籽粒品质的影响[J]. 山东农业科学, 2008, (5): 42-45.
Yin W J, Liu Q, Zhang L N *et al*. Effects of application stages and rates of potassium on quality of maize with different starch contents[J]. Shandong Agric. Sci., 2008, (5): 42-45.

[5] 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 Nutr. Fert. Sci., 2005, 11(5): 620-626.

[6] 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]. J. Maize Sci., 1999, 7(3): 68-72.

[7] 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 Nutr. Fert. Sci., 2011, 17(2): 325-332.

[8] 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 application rate on yield and potassium use efficiency of summer maize under high yield conditions [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2012, 18, (4): 832-838.

[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. Effect of potassium nutrition on dry matter and nutrients accumulation and translocation at reproductive stage of maize[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2009, 15(4): 799-807.

[10] 沈善敏. 长期土壤肥力试验的科学价值[J]. 植物营养与肥料学报, 1995, 1(1): 1-9.
Shen S M. The scientific value of long-term soil fertility experiment[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 1995, 1(1): 1-9.

[11] 王宜伦, 谭金芳, 韩燕来. 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.
Wang Y L, Tan J F, Han Y L. Effects of different potassium fertilizer application rates on yield, plant K accumulation of summer maize and K - efficiency in alluvial soil[J]. Southwest China J. Agric. Sci., 2009, 22(1): 110-113.

[12] 齐文增, 陈晓璐, 刘鹏, 等. 超高产夏玉米干物质与氮磷钾养分积累与分配特点[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19 (1): 26-36.
Qi W Z, Chen X L, Liu P *et al*. Characteristics of dry matter, accumulation and distribution of N, P and K of super-high-yield summer maize[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2013, 19(1): 26-36.

[13] 赵尚文, 于海秋, 于泳, 等. 低钾胁迫对不同耐低钾玉米自交系钾素吸收和积累的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2009, 40(3): 264-268.
Zhao S W, Yu H Q, Yu Y *et al*. Effect of low potassium stress on potassium assimilation and accumulation of maize varieties with different potassium sensitivities[J]. J. Shenyang Agric. Univ., 2009, 40(3): 264-268.

[14] 张水清, 黄绍敏, 刘建青, 等. 长期定位施肥对冬小麦干物质生产、产量形成及钾素吸收分配的影响[J]. 土壤, 2012, 44(4): 680-685.
Zhang S Q, Huang S M, Liu J Q *et al*. Effects of long-term fertilization on dry matter production, yield formation, K uptake and distribution of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Soils, 2012, 44(4): 680-685.

[15] 熊明彪, 雷孝章, 宋光煜, 曹叔尤. 长期施肥条件下小麦对钾素吸收利用的研究[J]. 麦类作物学报, 2004, 24(1): 51-54.
Xiong M B, Lei X Z, Song G Y, Zao S Y. Studies on K absorption and utilization in wheat under long-term fertilization [J]. J. Tritic. Crops, 2004, 24(1): 51-54.

[16] 舒海燕, 常胜合, 杨铁钊. 烟草钾素外排及其预防的初步研究[J]. 作物杂志, 2005, (2): 16-17.
Shu H Y, Chang S H, Yang T Z. Study on the potassium excretion and its preventing of baccy[J]. Crops, 2005, (2): 16-17.

[17] 谭金芳, 介晓磊, 韩燕来, 等. 潮土区超高产麦田供钾特点与小麦钾素营养研究[J]. 麦类作物学报, 2001, 21(1): 45-50.
Tan J F, Jie X L, Han Y L *et al*. Study on potassium supplying properties in super-high yield wheat field in chao soil region and potassium nutrition characteristics of wheat[J]. J. Tritic. Crops, 2001, 21(1): 45-50.

[18] 黄绍文，金继运，王泽良，等. 北方主要土壤钾形态及其植物有效性研究[J]. 植物营养与肥料学报，1998，4(2)：156-164.
Huang S W, Jin J Y, Wang Z L *et al*. Native potassium forms and plant availability in selected soils from northern China[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 1998, 4 (2): 156-164.

[19] Sharma A, Jalali V K, Arora S. Non-exchangeable potassium release and its removal in foot-hill soils of North-west Himalayas [J]. Catena, 2010, 82: 112-117.

[20] Benipal D S, Pasricha N S. Non-exchangeable K release and supplying power of Indo-Gangetic alluvial soils[J]. Geoderma, 2002, 108: 197-206.

[21] 葛玮健，常艳丽，刘俊梅，等. 塿土区长期施肥对小麦-玉米轮作体系钾素平衡与钾库容量的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2012，18(3)：629-636.
Ge W J, Chang Y L, Liu J M *et al*. Potassium balance and pool as influenced by long-term fertilization under continuous winter wheat-summer maize cropping system in a manural loess soil[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2012, 18(3): 629-636.

[22] 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 Pedol. Sin., 2008, 45(5): 915-924.