

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

李文娟, 何萍*, 金继运

(农业部作物营养与施肥重点开放实验室, 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要: 为揭示钾素营养与玉米产量形成的关系, 研究了3个施钾水平(K_2O 0、113和225 kg/hm^2)对玉米生育后期植株不同器官干重及氮、磷、钾积累和转运的影响。结果显示, 施钾能显著提高玉米产量。随着施钾量的增加, 玉米生育后期干物质积累的最大速率和平均速率提高, 最大速率出现时间提前。玉米干物质在各器官中的分配比例随生长发育中心的转移而变化。生育后期干物质和养分由营养体向子粒转运, 其中干物质和氮、磷主要来源于穗部营养体的转运, 而钾则主要来源于叶片的转运。子粒中氮、磷、钾的积累量分别占总积累量的50.3%~57.1%, 59.6%~67.2%和14.0%~33.3%。施钾不但能增加子粒中干物质和氮、磷、钾养分的分配比例, 而且还有助于提高干物质和氮、磷、钾养分向子粒转运的转运率。氮的转运率以 K_1 处理(K_2O 113 kg/hm^2)最大, 为45.7%; 干物质、磷和钾的转运率以 K_2 处理(K_2O 225 kg/hm^2)最大, 分别为7.4%、62.6%和22.4%; 子粒养分中54.5%~60.6%的氮, 56.0%~85.8%的磷及52.4%~100.0%的钾可以依赖于营养体的转运。

关键词: 玉米; 干物质; 氮; 磷; 钾; 养分积累; 转运

中图分类号: S514.062

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2009)04-0799-09

Potassium nutrition on dry matter and nutrients accumulation and translocation at reproductive stage of maize

LI Wen-juan, HE Ping*, JIN Ji-yun

(Ministry of Agriculture Key Laboratory of Crop Nutrition and Fertilization/Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Field experiment was conducted to study the effect of potassium (K) nutrition on dry matter and nutrient accumulation and distribution under three K levels (K_2O 0, 113 and 225 kg/ha) at reproductive stage of maize to explore the relationship between K nutrition and grain formation in maize. Results indicated that maize yield was significantly increased by K application. Both the maximum and average dry matter accumulation rate was accelerated, and the maximum dry matter accumulation rate occurred early by K application. The distribution proportion of dry matter in different organs varied distinctly. Dry matter, N and P in grain were mainly translocated from spike, and K in grain was mainly translocated from leaves. The contribution percentage of grain nutrient absorption to the whole plant at maturity was 50.3% - 57.1%, 59.6% - 67.2%, and 14.0% - 33.3% for N, P and K, respectively. K application could not only increase the distribution proportion of dry matter, N, P, and K nutrition to grain, but also enhance their translocation rates. The maximum N translocation rates of 45.7% was obtained by K_1 treatment K_2O 113 kg/ha , while the maximum dry matter, P and K translocation rate of 7.4%, 62.6% and 22.4% was achieved by K_2 treatment K_2O 225 kg/ha . 54.5% - 60.6% of N, 56.0% - 85.8% of P and 52.4% - 100.0% of K in grain relied on nutrient translocation from vegetative parts.

Key words: maize; dry matter; nitrogen; phosphorus; potassium; accumulation; translocation

收稿日期: 2008-06-04

接受日期: 2008-11-19

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“973”项目课题(2007CB109306); 国家自然科学基金(30571081); 北京市自然科学基金(6062025);

北京市科技新星计划(2005A60); 国际植物营养研究所(IPNI)资助。

作者简介: 李文娟(1982—), 女, 山西太原人, 博士研究生, 主要从事植物营养生理学研究。E-mail: liwenjuan972@sohu.com

* 通讯作者 Tel: 010-82108000, E-mail: phe@caas.ac.cn

合理施肥是实现作物高产的重要措施之一,也是调控生物产量及组分动态转化的重要手段^[1-3]。了解施肥对作物干物质积累和养分吸收的影响规律有助于采取有效措施调控作物生长发育,提高作物产量。玉米是一种高光效 C4 植物,强大的光合作用能力使得玉米在生育期内能积累较大的生物产量。不同生长阶段,植株体内的干物质积累和养分吸收情况不同;抽雄期后,玉米进入生殖生长阶段,此阶段玉米对氮、磷、钾的吸收情况与子粒产量的形成关系密切^[4]。钾对玉米养分吸收和干物质积累的影响虽已有报道,但多针对整个生育期物质累积和养分吸收动态的影响^[5-7],而集中研究钾对玉米生殖生长期各器官干物质积累和养分转运规律的报道并不多见。本试验通过对不同施钾水平对玉米生育后期干物质和养分分配、转运和积累规律的影响研究,旨在进一步了解玉米产量形成与钾素营养之间的关系,为玉米合理施钾提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

田间小区试验在吉林省公主岭市刘房子村钾肥长期定位试验地进行。该定位试验开始于 1993 年,供试土壤为中等肥力黑土。其基础肥力为: pH 6.6,有机质 22.4 g/kg,碱解氮 97.3 mg/kg,速效磷 14.2 mg/kg,速效钾 130.0 mg/kg。试验设 3 个施钾处理,施用量(K_2O kg/hm²)为: 0(K_0), 113(K_1), 225(K_2), 3 次重复,随机排列。各处理均施 N 225 kg/hm²和 P_2O_5 113 kg/hm²,其中氮肥 1/3 底施,2/3 于拔节期追施;磷、钾肥全部作为底肥条施。氮、磷、钾肥料为尿素、磷酸二铵和氯化钾,小区面积 4 m × 10 m。

2006 年试验时 K_0 、 K_1 和 K_2 处理的土壤速效养分状况见表 1(ASI 方法)。供试玉米品种为张玉 1059 种植密度为 5×10^4 株/hm²。4 月 30 日播种,5 月 19 日出苗,常规管理。

表 1 供试土壤基本养分状况(2006)

Table 1 Basic nutrient status of tested soils

处理 Treat.	pH	有机质 OM (g/kg)	NH_4^+ -N (mg/L)	速效磷 Avail. P (mg/L)	速效钾 Avail. K (mg/L)
K_0	5.6	27	17.5	26.3	64.6
K_1	5.6	28	18.7	24.3	86.8
K_2	5.5	28	21.7	26.0	122.8

1.2 采样及测定

于玉米抽雄期(8 月 1 日)开始取样,按小区独立取样,每 10 d 取一次,共取 5 次。样品按叶片、茎秆、根、叶鞘、穗部营养体(苞叶和穗轴)和子粒分别测定干重及氮、磷、钾含量。样品于 105℃ 杀青 30 min,然后 80℃ 烘干称重。全量氮、磷、钾的测定采用浓硫酸-双氧水消煮;采用凯氏定氮法测定氮素含量,钒钼黄比色法测定磷素含量,原子吸收分光光度法测定钾素含量。

1.3 数据分析与相关计算

各施肥处理玉米总生物量(y)依抽雄后天数(x)的增长过程用 Logistic 方程 $y = k/(1 + ae^{-bx})$ 描述,并根据该方程求得其最大增长速率及其出现的日期。对上述 Logistic 方程 $y = k/(1 + ae^{-bx})$ 求时间导数,得出干物质累积及养分吸收的速率方程:

$$y = abke^{-bx}/(1 + ae^{-bx})^2$$

将不同时间(x)干物质质量(y)及所确定的 a 、 b 参数的相应值带入上述导数方程,求出不同时间的干物质累积速率或养分吸收速率,以干物质累积速率或某种养分的吸收速率为纵坐标,以时间 x (d)为横坐标,得出干物质累积速率曲线。

营养体干物质转运量(kg/hm²)= 营养体最大干重 - 营养体成熟期干重;

养分转运量(kg/hm²)= 营养体养分最高积累量 - 成熟期营养体养分积累量;

营养体转运率(%)= 营养体转运量(kg/hm²)/营养体最高积累量(kg/hm²) × 100。

数据统计分析采用 Microsoft Excel 和 SAS 9.0 软件处理。

2 结果与分析

2.1 钾对玉米产量的影响

施钾处理的玉米产量显著高于不施钾处理, K_0 、 K_1 、 K_2 处理产量为 10603 ± 340 、 11715 ± 475 、 11510 ± 443 kg/hm², K_1 和 K_2 比 K_0 分别增产 10.5% 和 8.6%,差异显著;而两施钾处理间的产量无明显差别。

2.2 钾对玉米生育后期干物质积累和转运的影响

2.2.1 干物质积累动态及积累速率 表 2 看出,玉米生育后期干物质积累的最大速率和平均速率均表现为 $K_2 > K_1 > K_0$,且随施钾量的增加,最大速率出现的天数提前。干物质积累的最大速率 K_1 、 K_2 比 K_0 处理分别提前了 15.5 和 24.3 d。抽雄期正值玉米营养生长和生殖生长转换的关键时期,此时干物

质积累速率最大。不施钾肥不仅降低了干物质积累最大速率和平均速率,而且最大速率出现时间延迟,错过了干物质增长最快时期,不利于子粒灌浆,因而产量较低。

由干物质积累速率曲线可看出(图1),在抽雄开始30 d内,干物质的积累速率都是 $K_2 > K_1 > K_0$;

在抽雄期开始30 d后,干物质的积累速率表现为 $K_0 > K_1 > K_2$ 。施用钾肥能提高玉米子粒抽雄期干物质积累速率,对产量的形成有着重要的促进作用;而 K_0 处理没有表现出干物质快速增长期中较高的干物质积累速率,不利于产量形成。

表2 玉米生育后期干物质积累速率

Table 2 Accumulation rate of dry matter at reproductive stage of maize

处理 Treatment	回归方程 Regression equation	速率 Rate[g/(plant·d)]		最大速率出现的天数(d) The days of HIR	r
		最大 Max.	平均 Avg.		
K_0	$y = 548.0 / (1 + 2.22e^{-0.030x})$	4.07	3.85	26.8	0.986
K_1	$y = 535.7 / (1 + 1.47e^{-0.034x})$	4.55	3.90	11.3	0.969
K_2	$y = 460.2 / (1 + 1.24e^{-0.049x})$	5.58	4.21	4.5	0.998

$r_{0.01}(4) = 0.917$; $r_{0.05}(4) = 0.811$. HIR: 最大增长速率 Highest increase rate

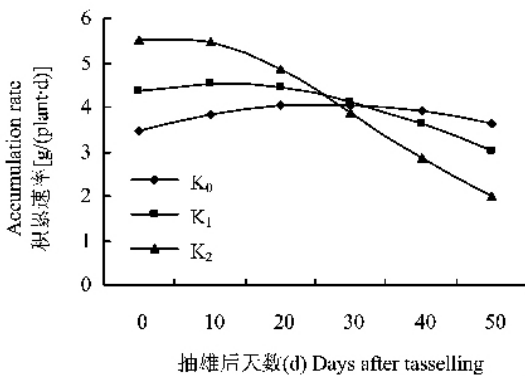


图1 玉米抽雄后干物质积累速率曲线

Fig.1 Dry matter accumulation curve of maize after tasselling

2.2.2 干物质分配 干物质在各器官的分配随着生长中心转移而发生变化。表3看出,在抽雄前(0 d),叶片和茎秆的干物质积累量占全株干物质积累量的比例最高,分别达到26.5%~30.8%和33.7%~34.3%。叶片和茎秆是玉米营养生长末期光合产物主要的分配器官,也是此时植株的生长中心。抽雄后植株生长中心开始向穗部转移,此时穗部干物质的比例略有升高;进入灌浆期(抽雄后20 d),子粒开始成为光合产物主要分配中心,到完熟期(抽雄后50 d)子粒干重约占全株干重的40%以上。随着生殖生长的推进,干物质在叶片、茎秆、根、叶鞘、穗中的分配比例不断下降;子粒中的分配比例不断升高。

从不同施钾处理干物质在各器官的分配看出,在生育后期,施钾处理的茎秆、根、子粒中干物质的分配比例都高于不施钾处理;而叶片、叶鞘、穗部营

养体中干物质的分配比例却低于不施钾处理。在提高子粒重的同时,钾素有利于增加茎秆和根中物质分配比例,对玉米植株在生育后期保持旺盛的根系活力和抗倒伏方面有着重要的意义。

2.2.3 干物质转运 施用钾肥均增加了春玉米生育后期各器官的干物质重量(表4)。进入抽雄期后,玉米子粒形成开始,营养器官中光合产物向子粒转运。 K_0 处理叶片干重最大值出现于抽雄后30 d;而 K_1 、 K_2 处理,叶片干重的最大值分别出现于抽雄开始时(0 d)和抽雄后20 d。施钾使叶片中物质积累的最大值提前出现。同样,施钾也使根的最大干重值提前出现了30 d。在抽雄后根和叶鞘中干物质有一个明显的下降过程,之后趋于平稳;而穗部营养体干重则有一个明显的上升过程,之后开始逐渐下降。施钾能显著提高营养物质向穗部转运的速率和强度。在抽雄开始的10 d中, K_1 和 K_2 处理的穗部营养体分别增重27.9和42.6 g/plant,而 K_0 处理仅增重16.9 g/plant。可见,在生殖生长期,营养体中所积累的物质先集中转运至穗部营养体,再由穗部营养体向子粒转运,以此加强源向库转运的强度。

表4还看出,钾素均提高了玉米各器官的物质转运量;不同钾素营养条件下,营养体物质输出的部位也有所差别。 K_1 、 K_2 处理,穗部营养体的转运量最高,分别为10.8和16.9 g/plant;而在 K_0 处理中玉米穗部营养体中的转运量仅为2.0 g/plant,远小于施钾处理的转运量。计算物质的转运率得出,不施钾处理下,叶鞘中物质的转运率最大,其次是根和穗部营养体; K_1 和 K_2 处理中,根中的物质转运率

表 3 玉米生育后期干物质在各器官间的分配比例 (%)

Table 3 Distribution proportion of dry matter at reproductive stage of maize

器官 Organ	处理 Treatment	抽雄后天数 Days after tasselling (d)					
		0	10	20	30	40	50
叶片 Leaf	K ₀	30.8	28.0	20.5	18.9	15.9	14.8
	K ₁	26.5	24.2	20.2	16.0	15.4	13.3
	K ₂	27.1	23.2	18.4	16.3	15.2	13.9
	LSD _{0.05}	2.5	3.9	ns	2.2	ns	ns
茎秆 Stalk	K ₀	34.0	33.3	26.5	21.8	19.8	18.3
	K ₁	33.7	31.3	21.7	21.9	20.8	19.7
	K ₂	34.3	31.9	27.0	22.7	22.3	19.5
	LSD _{0.05}	ns	ns	ns	ns	2.1	ns
根 Root	K ₀	8.9	6.3	5.6	5.4	4.8	4.4
	K ₁	11.4	7.2	6.8	5.9	5.6	4.2
	K ₂	12.4	7.2	6.4	6.3	5.5	4.6
	LSD _{0.05}	2.1	ns	0.8	0.8	ns	ns
叶鞘 Sheath	K ₀	14.2	12.4	8.9	6.9	7.1	6.2
	K ₁	13.3	10.4	9.3	6.1	6.0	5.7
	K ₂	13.0	10.8	8.6	7.1	6.7	6.0
	LSD _{0.05}	1.0	1.4	ns	0.7	1.0	ns
穗部营养体 Bracteal leaf and ear axis	K ₀	12.1	20.0	20.5	17.1	16.1	13.9
	K ₁	15.0	26.9	17.8	16.7	16.7	12.3
	K ₂	13.2	26.9	17.5	16.1	14.5	12.7
	LSD _{0.05}	ns	5.6	2.6	ns	1.7	ns
子粒 Grain	K ₀	—	—	18.0	29.8	36.2	42.4
	K ₁	—	—	24.2	33.4	35.6	44.7
	K ₂	—	—	22.2	31.6	35.9	43.2
	LSD _{0.05}	—	—	4.0	ns	ns	ns

注 (Note): ns 表示处理间在 5% 水平上差异不显著,下同 No significant at the 5% level according to LSD at different K treatments. The same below.

最大,其次是穗部营养体和叶鞘。叶片和茎秆中的干物质向子粒的转运量较少,转运率较低。营养体转运量占子粒干重的百分比由 K₀ 处理的 1.3% 增加到 K₁ 的 7.6% 和 K₂ 的 10.4%。可见,钾素营养显著促进了玉米生殖生长后期营养物质向子粒的转运。

2.3 钾对玉米生育后期氮、磷、钾养分积累与转运的影响

2.3.1 氮、磷、钾养分积累 玉米生育后期,随着生殖生长的进行,玉米营养体氮、磷、钾积累量不断减少,子粒氮、磷、钾积累量不断增加;至成熟期,子粒中氮积累量占总积累量的 50.3%~57.1%,磷积累量占总积累量的 59.6%~67.2%,钾积累量占总积累量的 14.0%~33.3%(表 5)。施钾处理,玉米营养体和子粒氮、磷、钾养分积累量均高于不施钾处理。与 K₀ 处理相比,K₁、K₂ 处理成熟期子粒氮积累量分别增加了 28.4% 和 21.4%;磷积累量分别增加了

23.0% 和 13.1%;钾积累量分别增加了 14.6% 和 6.1%。

2.3.2 氮、磷、钾养分转运 玉米子粒形成中,54.5%~60.6% 的氮都来自于营养体的转运(表 6)。除穗部营养体的氮转运量和转运率随着施钾量增加而增加外,其他玉米器官(叶片、茎秆、根、叶鞘)中,均以 K₁ 处理的氮转运量最高,转运率最大。缺钾造成玉米生育后期氮从营养体向子粒的转运量减少,转运率降低,转运量占子粒积累量的比例减少。各器官氮转运量的变化趋势为:穗部营养体 > 叶片 > 茎秆 > 叶鞘 > 根。

在玉米生育后期,与不施钾处理相比,施钾处理各器官的磷转运量和转运率均显著提高(表 6)。子粒形成过程中,56.0%~85.8% 的磷来源于营养体的转运,磷转运量占子粒积累量的比例随着施钾量的增加而增加。各器官中磷的转运量以穗部营养体最大,其次是茎秆,叶鞘的转运量最低。

表 4 不同钾处理对玉米生育后期营养体物质转运的影响

Table 4 Effect of potassium on transport of dry matter at reproductive stage of maize

器官 Organ	处理 Treatment	干物质积累 Accumulation of dry matter (g/plant)						转运量 Amount of translocation (g/plant)	转运率 Translocation rate (%)	占子粒重比例 Percentage to grain weight (%)
		抽雄后天数 Days after tasselling (d)								
		0	10	20	30	40	50			
叶片 Leaf	K ₀	54.0	52.0	53.3	54.9	50.1	54.5	0.4	0.7	0.3
	K ₁	62.2	54.8	60.3	58.4	57.9	56.1	6.1	9.8	3.2
	K ₂	55.4	58.7	58.8	57.2	58.2	58.0	0.9	1.5	0.5
	LSD _{0.05}	5.3	ns	5.7	ns	4.2	ns			
茎秆 Stalk	K ₀	59.9	62.8	69.2	63.2	62.3	67.4	1.8	2.6	1.1
	K ₁	79.1	71.6	84.5	79.4	78.7	81.6	3.0	3.5	1.6
	K ₂	70.7	81.0	86.6	79.6	86.3	81.4	5.2	6.0	2.9
	LSD _{0.05}	9.5	14.2	8.2	7.8	9.0	9.8			
根 Root	K ₀	15.9	12.3	14.5	16.2	15.3	15.7	0.5	3.1	0.3
	K ₁	26.7	16.0	20.6	21.5	21.4	17.9	8.8	33.0	4.6
	K ₂	25.6	18.2	20.5	22.4	21.3	19.1	6.5	25.2	3.6
	LSD _{0.05}	5.7	4.2	3.6	3.6	4.6	3.2			
叶鞘 Sheath	K ₀	24.9	23.3	23.4	20.0	22.4	22.8	2.2	8.6	1.4
	K ₁	31.3	23.5	28.0	22.2	22.6	24.2	7.0	22.5	3.7
	K ₂	27.1	27.5	27.7	25.1	25.7	25.0	2.6	9.5	1.5
	LSD _{0.05}	4.7	4.1	4.4	2.7	3.0	ns			
穗部 营养体 Cob	K ₀	21.7	38.6	53.4	49.7	50.9	51.5	2.0	3.7	1.3
	K ₁	35.2	63.1	53.2	61.1	61.1	52.3	10.8	17.1	5.7
	K ₂	27.7	70.3	56.3	56.8	56.0	53.4	16.9	24.0	9.4
	LSD _{0.05}	8.9	19.6	ns	8.6	7.6	ns			
营养体 Vegetative mass	K ₀	176.4	189.0	213.8	203.0	200.9	212.5	2.0	0.9	1.3
	K ₁	234.4	229.0	243.7	242.5	241.7	234.0	14.5	5.9	7.6
	K ₂	206.5	255.7	249.8	241.1	247.5	236.9	18.8	7.4	10.4
	LSD _{0.05}	29.4	38.2	24.2	17.9	18.6	23.2			

钾素转运量和转运率随着施钾量增加而显著增加。表 6 表明, K₀ 处理下, 玉米茎秆、根、穗部营养体中的钾素几乎没有发生转运, 子粒中钾主要依赖于叶片和叶鞘中的转运, 47.6% 以上的钾需要玉米从土壤中获得。在充足供钾的条件下, 叶片、茎秆、根、叶鞘和穗部营养体中的钾转运量都显著增加, 子粒吸钾量的 68.7% 以上都依赖营养体的转运; 过量施钾虽增加钾转运量, 但造成钾素量流失。

2.4 钾对玉米生育后期干物质和养分阶段积累百分比的影响

在玉米生育后期, 植株干物质积累量占植株个体干物重的 45% 以上, 氮和磷的积累约占 30% 左右; 钾的积累百分比在 3 个钾处理间差异较大, 其中 K₀ 处理中为 15% 左右, 而 K₁ 为 5%、K₂ 仅为 3%。随着施钾量的增加, 玉米生育后期吸钾量占整个生育期吸钾量的比例明显减少(图 2)。

3 讨论

3.1 干物质分配、转运与积累

金继运等^[8]研究指出, 玉米总生物量(y)依出苗后天数(x)的增长过程为不对称的 S 型曲线, 可用 Logistic 方程 $y = k/(1 + ae^{-bx})$ 描述。本研究首次将玉米生育后期总生物量(y)依抽雄后天数(x)的增长过程运用该方程进行描述, 也得到了很好的效果; 并根据拟合后的方程求出玉米生育后期干物质增长的最大速率及其出现的时间。结果显示, 施用钾肥均提高了玉米生育后期干物质积累的最大速率和平均速率^[9], 且使最大速率出现的时间提前, 与 K₀ 相比, K₁、K₂ 处理中, 干物质积累的最大速率分别提前了 15.5 和 24.3 d。

干物质在各器官的分配随生长发育中心转移而变化^[10-11]。抽雄前期, 主要分配在叶片和茎秆中, 抽雄后期主要分配在穗部营养体中, 进入灌浆期,

表 5 玉米生育后期氮、磷、钾积累量 (g/plant)

Table 5 N, P, K absorption content at reproductive stage of maize

抽雄后天数 Days after tasselling (d)	处理 Treatment	氮 Nitrogen		磷 Phosphorous		钾 Potassium	
		营养体	子粒	营养体	子粒	营养体	子粒
		Vegetative mass	Grain	Vegetative mass	Grain	Vegetative mass	Grain
0	K ₀	3.216		0.490		1.694	
	K ₁	3.723		0.625		3.914	
	K ₂	3.310		0.458		5.120	
	LSD _{0.05}	0.292		0.048		0.804	
10	K ₀	3.151		0.473		1.400	
	K ₁	3.275		0.507		3.517	
	K ₂	3.748		0.615		5.825	
	LSD _{0.05}	0.596		0.050		0.680	
20	K ₀	2.848	0.794	0.420	0.138	1.300	0.402
	K ₁	2.962	1.103	0.413	0.233	3.898	0.489
	K ₂	2.918	1.109	0.425	0.214	5.507	0.523
	LSD _{0.05}	ns	0.207	ns	0.034	0.607	0.097
30	K ₀	2.525	1.313	0.348	0.227	1.268	0.592
	K ₁	2.509	1.775	0.295	0.323	3.548	0.692
	K ₂	2.588	1.606	0.329	0.249	5.264	0.656
	LSD _{0.05}	ns	0.278	0.050	0.070	0.810	0.095
40	K ₀	1.795	1.538	0.261	0.293	1.246	0.586
	K ₁	1.961	1.825	0.237	0.340	3.530	0.712
	K ₂	2.005	1.808	0.255	0.338	5.077	0.738
	LSD _{0.05}	ns	0.232	ns	ns	0.526	0.017
50	K ₀	2.073	2.096	0.268	0.396	1.343	0.670
	K ₁	2.020	2.691	0.238	0.487	3.387	0.768
	K ₂	2.207	2.545	0.230	0.448	4.518	0.734
	LSD _{0.05}	0.125	0.361	0.036	0.080	0.663	0.085

子粒成为光合产物分配的主要中心。刘梦星等^[12]研究认为,从吐丝期至完熟期,玉米叶片和茎鞘干重占植株总重的变化随着生育进程的推进而逐渐降低,其中叶片干重所占比例由 31.76%~34.40%降至 8.99%~10.15%,茎鞘干重所占比例由 55.3%~58.34%降至 21.53%~23.30%;从灌浆期开始子粒干重所占比例不断增加,由 9.34%~10.58%增至 52.31%~56.41%,且施钾增加了吐丝后子粒中干物质的分配比例。与其研究结果相似,本研究显示,从抽雄期至成熟期,干物质在叶片的分配比例由 26.5%~30.8%降至 13.3%~14.8%,干物质在茎秆中的分配比例由 33.7%~34.3%降至 18.3%~19.7%,干物质在叶鞘中的分配比例由 13.0%~14.2%降至 5.7%~6.2%;从灌浆至成熟期子粒干重由 18.0%~24.2%增至 42.4%~44.7%,且施钾减少了成熟期叶片、叶鞘及穗部营养体中干物质的分配比例,增加了茎秆、根和子粒中干物质的分配。

春玉米子粒干物质的来源中,有一部分来源于

抽雄前营养体的转运。金继运等^[13]的研究表明,不同钾处理中,干物质转移量占子粒重的 11.3%~16.8%。K₀ 处理转移量最低, K₁₅₀ 处理最高。由于品种原因,本研究中干物质转移量占子粒重的比例略低于金继运等的研究结果,但钾对其影响的规律基本一致。本研究得出, K₁ 和 K₂ 处理生育前期贮存于叶片、茎秆、叶鞘、根及穗部营养体的干物质,在生育后期的转运量占完熟期子粒重的 7.6% 和 10.4%,而 K₀ 处理仅为 1.3%。缺钾条件下,营养体干重向子粒的转运量和转运率均显著下降。穗部营养体是干物质转运的主要器官,叶片和茎秆中的转运量相对较少。

3.2 氮、磷、钾养分转运与积累

从抽雄期至完熟期,玉米营养体氮、磷、钾的积累量不断减少,子粒中氮、磷、钾的积累量不断增加。施钾不但促进了植株生殖生长阶段对氮、磷、钾的吸收,而且还促进了此阶段营养器官中氮、磷的再分配,即以较高的比例运转到子粒中去;而低钾处

表 6 不同钾处理对玉米生育后期氮、磷、钾转运的影响

Table 6 Effect of potassium on N, P, K translocation at reproductive stage maize

器官 Organ	处理 Treatment	最大积累量比例 Max. absorption (g/plant)			成熟期积累量 Absorption in maturity (g/plant)			转运量 Amount of transfer (g/plant)			转运率 Translocation rate (%)			占子粒积累量比例 Percentage of grain absorption (%)		
		N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K
叶片 Leaf	K ₀	1.53	0.21	0.63	1.11	0.15	0.32	0.43	0.06	0.31	28.0	29.3	49.1	20.5	15.7	46.5
	K ₁	1.55	0.21	1.16	1.04	0.12	0.84	0.51	0.09	0.31	32.7	43.1	27.1	18.9	18.5	40.8
	K ₂	1.46	0.21	1.40	1.10	0.11	1.08	0.36	0.10	0.33	24.6	47.0	23.3	14.1	22.3	44.5
	LSD _{0.05}	0.095	ns	0.24	ns	0.028	0.119									
茎秆 Stalk	K ₀	0.70	0.12	0.40	0.40	0.05	0.40	0.31	0.07	0.00	43.7	59.8	0.0	14.6	18.6	0.0
	K ₁	0.79	0.17	1.56	0.43	0.06	1.43	0.36	0.11	0.13	45.6	64.9	8.5	13.4	22.1	17.1
	K ₂	0.79	0.15	2.55	0.59	0.04	2.09	0.20	0.10	0.45	25.3	71.8	17.8	7.8	23.2	61.9
	LSD _{0.05}	0.027	0.023	0.336	0.156	0.012	0.425									
根 Root	K ₀	0.18	0.03	0.13	0.15	0.01	0.13	0.02	0.03	0.00	12.8	74.6	0.0	1.1	6.4	0.0
	K ₁	0.26	0.07	0.37	0.13	0.01	0.31	0.13	0.06	0.06	50.7	87.7	16.3	5.0	11.7	7.8
	K ₂	0.23	0.04	0.48	0.12	0.01	0.40	0.11	0.02	0.08	47.5	65.5	16.8	4.3	5.2	10.9
	LSD _{0.05}	0.058	0.013	0.11	ns	ns	0.10									
叶鞘 Sheath	K ₀	0.35	0.05	0.30	0.23	0.03	0.15	0.12	0.02	0.150	34.2	40.5	50.8	5.7	5.6	22.4
	K ₁	0.37	0.05	0.71	0.21	0.03	0.34	0.16	0.02	0.37	43.1	44.5	52.6	5.9	4.9	48.7
	K ₂	0.30	0.05	0.84	0.20	0.03	0.45	0.10	0.02	0.39	34.3	42.4	46.5	4.1	4.4	53.2
	LSD _{0.05}	0.041	0.011	0.12	ns	ns	0.062									
穗部营养体 Bracteal leaf and ear axis	K ₀	0.57	0.11	0.36	0.19	0.03	0.35	0.38	0.08	0.01	67.0	74.1	2.3	18.3	20.0	1.2
	K ₁	0.83	0.15	0.65	0.21	0.02	0.47	0.62	0.13	0.17	74.8	84.7	26.6	23.0	25.8	22.4
	K ₂	1.07	0.20	0.86	0.20	0.04	0.50	0.87	0.16	0.36	81.0	81.2	41.6	34.1	35.5	48.7
	LSD _{0.05}	0.192	0.038	0.05	0.015	0.006	0.097									
营养体 Vegetative mass	K ₀	3.22	0.49	1.69	2.07	0.27	1.34	1.14	0.22	0.35	35.5	45.3	20.7	54.5	56.0	52.4
	K ₁	3.72	0.63	3.91	2.02	0.24	3.39	1.70	0.39	0.53	45.7	62.0	13.5	63.3	79.6	68.7
	K ₂	3.75	0.62	5.83	2.21	0.23	4.52	1.54	0.39	1.31	41.1	62.6	22.4	60.6	85.8	100.0
	LSD _{0.05}	0.330	0.052	0.527	0.125	0.036	0.663									

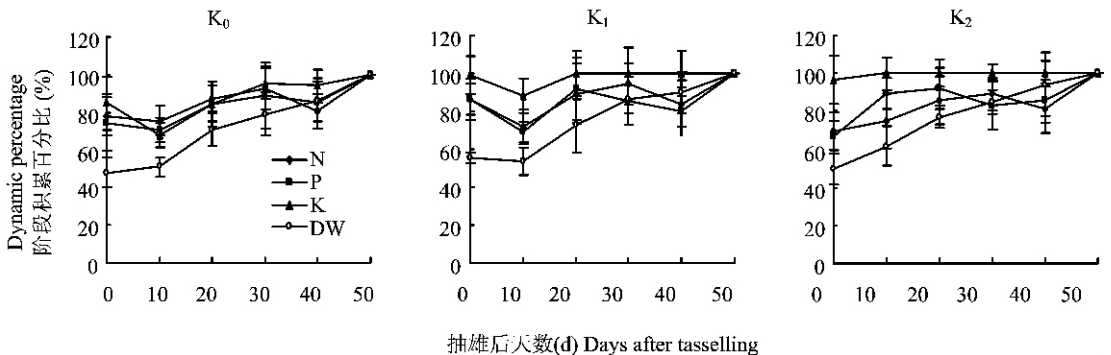


图 2 玉米生育后期干物质和养分阶段积累百分比

Fig.2 Dynamic percentages of dry weight and N, P, K nutrients at reproductive stage in maize

(DW—干物重 Dry matter)

理的氮、磷养分则较多滞留于营养器官中^[14]。本试验中, K₁ 处理氮转运率最大, 为 45.7%; 磷和钾的转运率以 K₂ 处理最大为 62.6% 和 22.4%。总体而

言, 玉米生育后期营养体磷转运率最大, 其次是氮, 钾转运率最小。施钾处理营养体中氮、磷、钾转运量占子粒积累量的比例显著高于不施钾处理, 穗部营

养体是氮和磷转运的主要器官,而叶片是钾转运的主要器官。营养体中钾素百分含量,随着施钾量的增加而增加,但子粒中钾的含量却没有呈现相同的趋势。刘景辉等^[15]研究指出,在子粒产量形成过程中,钾仅参与子粒代谢过程,其生理功能完成以后便从子粒转移出,很少在子粒中贮存。子粒养分中54.5%~60.6%的氮,56.0%~85.8%的磷及52.4%~100.0%的钾可以依赖于营养体的转运。

有研究表明,钾肥施用量在0~180 kg/hm²水平内,玉米产量随钾肥施用量的增加而提高,当钾肥用量达240 kg/hm²水平时玉米产量显著下降^[16]。本研究结果显示,K₂(K₂O 225 kg/hm²)处理的玉米产量虽略低于K₁(K₂O 113 kg/hm²)处理,但未达到显著水平。考虑到K₂处理肥料的投入成本大大增加,纯增产值下降,所以在生产实践中还应强调钾的适量施用。另外,玉米钾素积累量的66.7%~86.0%都储存于秸秆中,可见秸秆还田对于防止农田钾素亏缺具有重要意义。

玉米生育后期,植株干物质积累量占植株干物重的45%以上,而吸钾量却在5%以下。说明玉米对钾素的吸收主要在生育前期完成^[17-18]。鉴于钾在玉米生育后期对干物质和养分吸收、转运的重要作用,必须对玉米生育前期钾肥的充足供应予以重视。

参考文献:

- [1] Zhao R F, Chen X P, Zhang F S *et al.* Fertilization and nitrogen balance in a wheat-maize rotation system in north China[J]. *Agron. J.*, 2006, 98(4): 938-945.
- [2] Valentinuz O R, Tollenaar M. Effect of genotype, nitrogen, plant density, and row spacing on the area-per-leaf profile in maize[J]. *Agron. J.*, 2006, 98(1): 94-99.
- [3] 何萍, 金继运, 林葆, 等. 不同氮、磷、钾用量下春玉米生物产量及其组分动态与养分吸收模式研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 1998, 4(2): 123-130.
- He P, Jin J Y, Li B *et al.* Dynamics of biomass and its components and models of nutrients absorption by spring maize under different nitrogen, phosphorous and potassium application rates[J]. *Plant. Nutr. Fert. Sci.*, 1998, 4(2): 123-130.
- [4] 张颖. 北方春玉米不同生育期干物质积累与氮、磷、钾含量的变化[J]. *玉米科学*, 1996, 4(1): 63-65.
- Zhang Y. Changes of dry matter accumulation and N, P, K contents in different growth stages of spring maize in north China[J]. *J. Maize Sci.*, 1996, 4(1): 63-65.
- [5] 战秀梅, 韩晓日, 杨劲峰, 等. 不同氮、磷、钾肥用量对玉米源、库干物质积累动态的影响[J]. *土壤通报*, 2007, 38(3): 495-499.
- Zhan X M, Han X R, Yang J F *et al.* Dynamics changes of dry matter accumulation of maize as affected by different quantity of nitrogen and phosphorus and potassium[J]. *Chin. J. Soil Sci.*, 2007, 38(3): 495-499.
- [6] 王春枝, 葛海峰, 姚刚, 等. 钾肥对春玉米氮、磷、钾吸收动态模型及养分生产效率影响的研究[J]. *内蒙古农业大学学报*, 2000, 21: 148-152.
- Wang C Z, Ge H F, Yao G *et al.* Studies on the effect of potassium fertilizer on dynamic model of N, P, K uptake by spring maize and its productivity[J]. *J. Inn. Mong. Agric. Univ.*, 2000, 21: 148-152.
- [7] 杜雄, 张立峰, 李会彬, 等. 钾素营养对饲用玉米养分吸收动态及产量品质形成的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(3): 393-397.
- Du X, Zhang L F, Li H B *et al.* Effects of potassium application on nutrient absorption dynamics, biomass and quality formation of forage maize[J]. *Plant. Nutr. Fert. Sci.*, 2007, 13(3): 393-397.
- [8] 金继运, 何萍. 氮钾互作对春玉米生物产量及其组分动态的影响[J]. *玉米科学*, 1999, 7(4): 57-60.
- Jin J Y, He P. Dynamics of biomass and its components of spring maize as affected by nitrogen and potassium interaction[J]. *J. Maize Sci.*, 1999, 7(4): 57-60.
- [9] 赵利梅, 赵继文, 高炳德, 等. 钾肥对春玉米子粒建成与品质形成影响的研究[J]. *内蒙古农业大学学报*, 2000, 21(1): 11-15.
- Zhao L M, Zhao J W, Gao B D *et al.* Study of the effect of potassium fertilizer on seed and quality formative law of spring maize[J]. *J. Inn. Mong. Agric. Univ.*, 2000, 21(1): 11-15.
- [10] 刘克礼, 刘景辉. 春玉米干物质积累、分配与转移规律的研究[J]. *内蒙古农牧学院学报*, 1994, 15(1): 1-10.
- Liu K L, Liu J H. A study on the regularity of accumulation, distribution and translation of dry matter in spring maize[J]. *J. Inn. Mong. Inst. Agric. Anim. Husb.*, 1994, 15(1): 1-10.
- [11] 黄智鸿, 王思远, 包岩, 等. 超高产玉米品种干物质积累与分配特点的研究[J]. *玉米科学*, 2007, 15(3): 95-98.
- Huang Z H, Wang S Y, Bao Y *et al.* Studies on dry matter accumulation and distributive characteristic in super high-yield maize[J]. *J. Maize Sci.*, 2007, 15(3): 95-98.
- [12] 刘梦星, 崔彦宏, 丁民伟, 等. 氮、磷、钾及锌配施对旱薄区夏玉米干物质积累、分配和转移的影响[J]. *河北农业大学学报*, 2007, 30(1): 1-4.
- Liu M X, Cui Y H, Ding M W *et al.* Effect of nitrogen, phosphorus, potassium and micronutrients fertilizer on dry matter accumulation, and partitioning in summer maize in dry and infertile region[J]. *J. Agric. Univ. Hebei*, 2007, 30(1): 1-4.
- [13] 金继运, 何萍. 氮钾营养对春玉米后期碳氮代谢与粒重形成的影响[J]. *中国农业科学*, 1999, 32(4): 55-62.
- Jin J Y, He P. Effect of N and K nutrition on post metabolism of carbon and nitrogen and grain weight formation in maize[J]. *Sci. Agric. Sin.*, 1999, 32(4): 55-62.
- [14] 于振文, 张炜, 余松烈. 钾营养对冬小麦养分吸收分配、产量形成和品质的影响[J]. *作物学报*, 1996, 22(4): 442-447.
- Yu Z W, Zhang W, Yu S L. The effect of potassium nutrition on absorption and distribution of nutrient, yield formation and grain quality

- in winter wheat[J]. *Acta Agron. Sin.*, 1996, 24(4):442-447.
- [15] 刘景辉,刘克礼. 春玉米需氮规律的研究[J]. *内蒙古农牧学院学报*, 1994, 15(3):12-18.
- Liu J H, Liu K L. A study on the regularity of nitrogen requirement in spring maize[J]. *J. Inn. Mong. Inst. Agric. Anim. Husb.*, 1994, 15(3):12-18.
- [16] 韩立军. 不同施钾水平对玉米干物质及产量的影响[J]. *玉米科学*, 2006, 14(5):127-129.
- Han L J. Effect on dry substantial accumulations and yield of maize in different K fertilizer level[J]. *J. Maize Sci.*, 2006, 14(5):127-129.
- [17] 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.
- [18] 胡田田,肖玲,李岗,魏永东. 施肥对春玉米养分吸收和产量形成的影响[J]. *西北农业大学学报*, 1999, 27(5):11-16.
- Hu T T, Xiao L, Li G, Wei Y D. The effects of fertilization on nutrient absorption and yield formation of spring maize[J]. *Acta Univ. Agric. Boreali-Occid.*, 1999, 27(5):11-16.