植物营养与肥料学报 2013,19(4):773-780
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2013.0401

# 钾对不同基因型玉米生长、体内钾循环和分配的影响

王意琼[1],刘会玲[1],王艳群[1],王西志[1],李春俭[2],彭正萍[1]*
(1 河北农业大学资环学院,河北保定 071001;2 中国农业大学资源与环境学院,北京 100193)

**摘要:** 钾素循环和再利用对维持植物生长和提高钾利用效率非常重要。本文以杂交玉米豫玉 23 和兴农 998 为供试作物,采用供应高钾(1.85 mmol/L)和低钾(0.1 mmol/L)营养液的石英砂培养方法,研究不同基因型玉米各器官干重和钾积累及分配、体内钾在木质部和韧皮部中的循环、流动及钾效率等。结果表明,低钾处理 10 d 后,与高钾处理相比,低钾降低两玉米品种各器官干重净增量、钾浓度、钾积累量、钾吸收效率和木质部中钾的运输量,增加钾利用效率和源叶中韧皮部输出的钾,提高钾通过韧皮部的再循环量及占木质部运输总量的比例。低钾处理的豫玉 23 和兴农 998 上部叶均为钾库,钾积累量的 38.5% 和 70.3% 是由各自中、下部叶韧皮部输出的钾供给,但体内光合产物和钾向上部叶的运输是不完全同步的过程。两品种比较,低钾处理下的豫玉 23 较兴农 998 干重净增量提高,在于前者具有较大根量、较高钾吸收速率和较多钾素吸收量,木质部中有更多的钾通过叶片韧皮部输出进行循环运输进入上部叶;但豫玉 23 对介质中钾的吸收大于体内钾的再利用。钾营养高效基因型玉米应该具有较强的吸收和利用体内钾的能力。

**关键词:** 不同玉米基因型;钾水平;库源关系;钾循环和分配
**中图分类号:** S513.01;S143.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2013)04-0773-08

# Effects of potassium on plant growth, potassium cycle and distribution in different maize genotypes

WANG Yi-qiong[1], LIU Hui-ling[1], WANG Yan-qun[1], WANG Xi-zhi[1], LI Chun-jian[2], PENG Zheng-ping[1]*
(*1 College of Resources and Environmental Sciences, Agricultural University of Hebei, Baoding 071001, China;*
*2 College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China*)

**Abstract:** Potassium (K) cycling and recycling are important for maintaining plant growth and enhancing K use efficiency. Two maize (*Zea Mays* L.) hybrids, yuyu 23 and xingnong 998, were used as the testing materials. Two K levels, high (1.85 mmol/L) and low (0.1 mmol/L) were set up under the conditions of sand and nutrient culture. Dry weight, K accumulation and distribution in each organ of maize, K cycling and flowing between xylem and phloem, K uptake and use efficiency were studied. The results show that during the ten days after the high and low K applications, compare with the high K treatment, the dry weight, K concentration and accumulation in each plant organ, K uptake efficiency and transported amount in the xylem under the low K treatment are decreased, while the K use efficiency and retranslocated amount from leaves by phloem are increased. At the same time, the K recycling from lower leaves to roots through phloem is activated under the low K condition, and then transported to the upper leaves via xylem. The upper leaves of two maize cultivars are the K sink in the low K treatment, 38.5% and 70.3% of K are provided by phloem of the middle and lower leaves, but their assimilation is not synchronized with K transportation to the upper leaves. In the low K treatment, the dry weight increment of yuyu23 is higher than

**收稿日期:** 2012-11-14 **接受日期:** 2013-04-11
**基金项目:** 国家科技支撑计划粮丰工程河北项目区(2011BAD16B08,2012BAD04B06,2013BAD07B05);省自然科学基金项目(C2010000755);国家自然科学基金(31071362)资助。
**作者简介:** 王意琼(1988—),女,湖北竹溪人,硕士研究生,主要从事植物生理与生态研究。E-mail: 825907451@qq.com
* 通信作者 E-mail: pengzhengping@sohu.com

that of xingnong 998, because the cultivar of yuyu23 has larger root dry weight, greater K uptake efficiency and accumulation, more proportion K from xylem transported into the upper leaves, and the K uptake capacity of yuyu23 is stronger than the K use in whole plant. High K nutrient genotype of maize should have greater K uptake and use capacities.

**Key words:** different maize genotypes; K level; sink-source relationship; K cycle and distribution

钾是植物生长必需的大量营养元素之一,在植物生长、代谢、酶活性和渗透调节中发挥着重要作用。但我国土壤钾含量已由南低北高、东低西高,转变为由南方缺乏到北方缺乏,由经济作物缺乏到粮食作物缺乏,由高产田缺乏到中低产田缺乏[1]。据统计,中国约有70%～80%的耕地养分不足,缺钾耕地占60%左右,农田土壤速效钾年降幅0.58～3.32 mg/kg[2]。另外,由于钾肥价格较高,大部分地区农民在农业生产中长期形成了"重施氮、磷肥,不施或少施钾肥"的习惯。虽然我国土壤速效钾含量逐年降低,但土壤钾库却很巨大。黄绍文和金继运[3]指出,我国土壤钾含量丰富,土壤钾资源潜力巨大,只是生物有效性低,植物不能很好利用。因此,提高植物钾素营养效率,选择钾素营养高效基因型,挖掘作物自身潜力,是缓解我国农业生产缺钾问题的有效途径之一。

植物在生长过程中会遭受养分浓度过低、过高或不平衡等逆境胁迫。在长期进化过程中,植物形成了各种适应性机制,以增加在逆境条件下完成其生命周期的机会,体内养分再利用包含于其中。70年代至今,植物体内钾循环作用日渐清晰,钾循环研究方法也日趋完善,许多植物体内钾循环状况得到定量研究。Jeschke[4-5]在盐胁迫下采用矿质养分理论模型研究了蓖麻体内氮、碳的分布,而后描述了缺磷对蓖麻体内光合产物、磷、$NO_3^-$的运输和分配的影响。Armstrong 和 Kirkby[6]证明,番茄中循环的钾可达体内含钾量的20%,白羽扇豆中这一比例为40%以上。Siebrecht 和 Tischner[7]指出,杨树苗在缺钾11 d后,木质部汁液中$K^+$的浓度下降49%。Jiang 等[8]报道,低氮处理的烟株体内钾循环占体内含钾量的70%,而低钾处理的烟株体内这一比例为92%。到目前为止,尚没有发现关于钾胁迫条件下玉米体内钾的流动、循环和分配模式的报道。

为此,本文在采用聚类方法分析营养液和土培试验条件下40个玉米杂交种的生长性状并确定典型钾营养高效玉米基因型豫玉23和典型钾营养低效玉米基因型兴农998的基础上[9],以这两个品种为供试作物,采用根压法收集木质部汁液,研究不同供钾水平对两个玉米基因型生长发育、体内钾循环和分配以及钾效率的影响,为揭示玉米高效利用钾的机理、挖掘自身潜力、培育新品种提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试作物

供试作物为豫玉23和兴农998玉米杂交种。

### 1.2 试验设计及方法

本试验于中国农业大学日光温室进行。挑选大小及饱满度一致的上述两品种玉米种子,用10% $H_2O_2$表面消毒30 min,去离子水洗掉表面残留的$H_2O_2$,再用饱和$CaSO_4$浸泡5 h,放在铺有滤纸的托盘中催芽。待种子露白,播入滤纸中进行培养。幼苗长到一叶一心时,选生长基本一致的幼苗,移栽到预先装有2500 g石英砂(Ø0.25～0.50 mm)的PVC桶(Ø18 cm×12 cm)中。同时,部分幼苗移入特制不锈钢罐中(2.1 L)。每桶1株,为避免石英砂上长绿藻,用黑薄膜覆盖桶表面。每2 d浇一次营养液,浇至桶底有营养液渗出,倒掉底盘中的渗出液。培养24 d后,改为每天浇1次。营养液的组成[10](μmol/L):$MgSO_4$ 650, $Ca(NO_3)_2$ 2000, Fe-EDTA 100, $H_3BO_3$ 10, $MnSO_4$ 1.0, $ZnSO_4$ 1.0, $CuSO_4$ 0.1, $(NH_4)_6Mo_7O_{24}$ 0.005, $KH_2PO_4$ 250, $K_2SO_4$ 750, KCl 100。营养液初始pH 6.0±0.1。

玉米生长到9叶龄(40 d)时开始处理,将PVC桶中长势和发育基本相同的两玉米品种随机分成3组,每组重复6次(桶)。当天收获一组玉米作为基础样(第一次收获),即豫玉23 +$K_{1.85}$、兴农998 +$K_{1.85}$,同时,对两玉米品种其余2组中的1组仍进行高钾(含$K^+$ 1.85 mmol/L,记作$K_{1.85}$)处理,另外1组进行低钾处理(含$K^+$ 0.1 mmol/L,记作$K_{0.1}$),待第二次收获。低钾处理是先用自来水将石英砂中的营养液洗去,再用2.5 L低钾营养液淋洗;低钾处理10 d后,进行第二次收获,两玉米品种的$K_{1.85}$、$K_{0.1}$处理各1组。收获时,考虑到研究方法的准确性和玉米生长过程养分分配的实际情况,将植株分根、下部叶(1～6)、中部叶(7～8)、上部叶(第9片叶以上及茎)取样。具体试验处理和方法如图1所示。

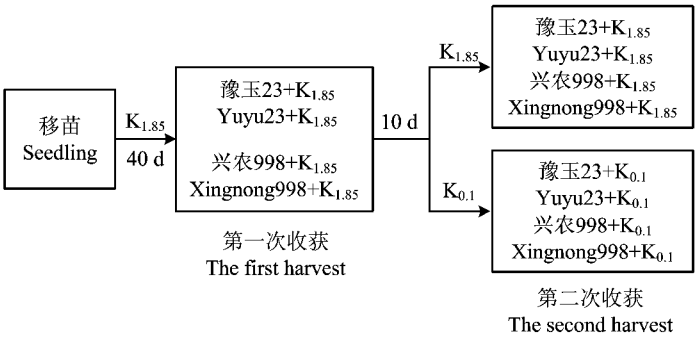


**图 1　试验处理及方法**

**Fig. 1　Experimental treatments and methods**

生长在特制不锈钢罐中的玉米培养 40 d 后,分 2 组,与 PVC 桶中玉米进行相同的 $K_{1.85}$ 和 $K_{0.1}$ 处理,$K_{0.1}$ 处理后第 2 d(培养 42 d),采用根压法收集木质部汁液[11]。在玉米的第 4(下部叶)、7(中部叶)、9(上部叶)叶位上第一次收集木质部汁液,收集木质部汁液装置见图 2;以后每 3 d 收 1 次,共收 3 次。收到的木质部汁液在 -20 ℃以下冰箱中保存待测。培养期间玉米生长条件为:温度 10 ~ 35 ℃,平均光照时间 11 h/d。

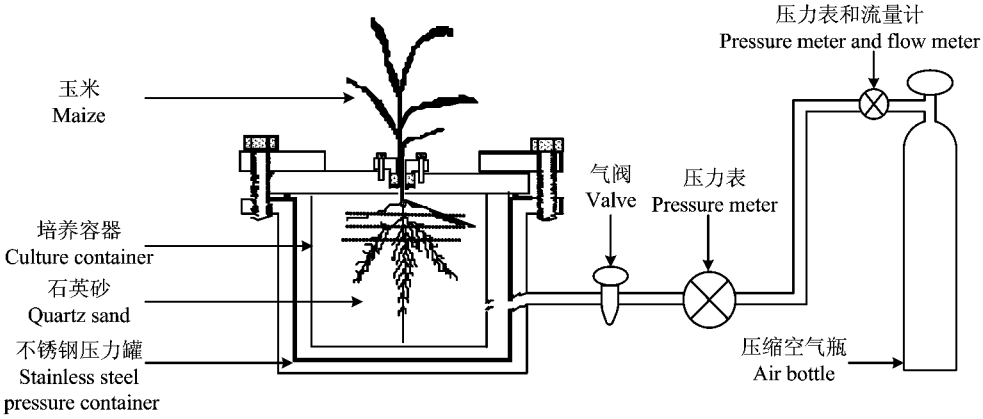


**图 2　木质部汁液收集装置示意图**

**Fig. 2　Sketch map of pressure chamber designed to collect xylem sap**

### 1.3　测定项目及方法

1.3.1 植株干重、钾和钙养分含量　植物样品于 105 ℃杀青 30 min 后,在 70 ℃烘至恒重。粉粹后,用 $H_2SO_4$-$H_2O_2$ 消煮,火焰光度法测定钾浓度,原子吸收分光光度法测定钙浓度[12]。计算各器官的干重净增量,其中各器官干重净增量等于第二次收获时各器官干重积累量减去第一次收获时相应各器官干重积累量。$Ca^{2+}$ 含量是为绘制钾养分循环图而测定的,本文不做详细分析。

1.3.2 木质部汁液中的钾和钙　收集到的木质部汁液用高纯水按照一定比例稀释后,直接在 ICP(PE 3300 DV,USA)上测定其中的钾、钙浓度。

1.3.3 钾效率　根据 Morris 和 Garrily[13] 提出的资源捕获量和利用效率的关系,植株单位时间钾吸收量定义为植物对钾的吸收效率;吸收单位钾产生的干物质量为植株体内钾的利用效率。

### 1.4　数据处理

1.4.1 钾养分循环模式图的计算　循环模式图的计算方法是建立在 Armstrong 和 Kirkby[6] 提出的理论基础上,并参考文献[10]。前提是植物只通过根系吸收养分。$Ca^{2+}$ 只能单向通过木质部运往地上部各器官,在韧皮部中几乎不移动。具体表述如下:

1) 在一定时期内由木质部运输进入植物体各器官的 $Ca^{2+}$ 量等于该时间段前后两次收获时该器官 $Ca^{2+}$ 的净增量($\Delta Ca$),即,$J_{Ca,xylem} = \Delta Ca$;

2) 在相对稳定的生长条件下,木质部中的 $K^+$

和 $Ca^{2+}$ 以恒定的含量比向地上部各器官运输，即 $[K/Ca]_{xylem}$，这一比值可通过测定木质部汁液中 $K^+$ 和 $Ca^{2+}$ 含量获得；

3）一段时期内通过木质部输入各器官的钾量等于各器官 $Ca^{2+}$ 的净增量乘以该器官木质部汁液中的钾钙比，即 $J_{K,xylem} = \Delta Ca \times [K/Ca]_{xylem}$；

4）韧皮部中输出的钾量等于各器官中的钾净增量减去木质部钾的输入量，即，$J_{K,pholem} = \Delta K - J_{K,xylem}$。

1.4.2 数据分析和养分循环模式图的绘制　采用 Microsoft excel 2003 和 SAS 8.1 软件进行数据处理和方差分析；用 FreeHand MX 软件绘制钾养分循环模式图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同基因型玉米各器官的干重分配

表1表明，第一次收获时，豫玉23各器官干重与兴农998无显著差异。低钾处理10 d后，两玉米品种干重净增量有上部叶 > 中部叶 > 下部叶的趋势，且无论高钾还是低钾两品种下部叶均有干物质输出；与高钾处理相比，低钾降低豫玉23和兴农998各器官干重净增量，整株干重净增量分别降低19.3%和63.6%；两品种比，除根系外，高钾处理下的两品种各器官和整株干重净增量无明显差别；低钾处理下的豫玉23各器官及整株干重净增量均高于兴农998。

**表1　不同钾水平下两玉米品种各器官的干重(g/plant)**

**Table 1　Dry weights of the different organs of two maize cultivars under different K levels**

| 品种 Cultivar | 处理 Treatment | 上部叶 Upper leaves | 中部叶 Middle leaves | 下部叶 Lower leaves | 根 Roots | 整株 Total |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 第一次收获 The first harvest | | | | | | |
| 豫玉23 Yuyu23 | $K_{1.85}$ | 4.21 a | 2.47 a | 1.34 a | 2.18 a | 10.20 a |
| 兴农998 Xingnong 998 | $K_{1.85}$ | 4.30 a | 2.50 a | 1.11 a | 1.93 a | 9.84 a |
| 10 d后干重净增量 Net dry weight increment after ten days | | | | | | |
| 豫玉23 Yuyu23 | $K_{1.85}$ | 7.81 a | 0.35 a | -0.13 a | 1.12 a | 9.15 a |
| | $K_{0.1}$ | 6.54 ab | 0.30 a | -0.12 a | 0.66 bc | 7.38 b |
| 兴农998 Xingnong 998 | $K_{1.85}$ | 7.97 a | 0.21 ab | -0.12 a | 0.74 b | 8.80 ab |
| | $K_{0.1}$ | 4.13 b | -1.27 c | -0.26 b | 0.60 c | 3.20 c |

注(Note)：同一时期同一列数值后不同小写字母表示5%水平差异显著 Different letters within the same column and harvest period are significant at the 5% level.

### 2.2 不同基因型玉米各器官的钾积累量

表2表明，低钾处理10 d后(第二次收获时)，高钾处理的两品种各器官钾浓度均显著高于低钾处理，且各器官钾浓度为上部叶 > 下部叶 > 中部叶 > 根；而低钾处理各器官的钾浓度为上部叶 > 中部叶 > 下部叶 > 根。两品种相比，低钾处理时，豫玉23各器官的钾浓度均低于兴农998。

表2还表明，第一次收获时，两品种各器官钾积累量上部叶 > 中部叶 > 下部叶 > 根。第二次收获时，两钾水平下玉米各器官钾积累量上部叶 > 中部叶 > 根 > 下部叶；与高钾比，低钾降低两品种各器官和整株钾积累量。比较两品种钾积累量，高钾时无显著差别，豫玉23和兴农998根系钾积累量分别占植株总钾量的9.0%和7.6%，上部叶钾积累量占总量的70.8%和73.9%；而低钾时，豫玉23整株钾积累量较兴农998提高了17.4%，二者根系钾积累量分别占植株总钾量的9.1%和8.9%，上部叶钾累积量分别占总量的72.9%和79.1%，表明钾供应充足，玉米根系从介质中吸收钾较多，体内钾再利用的比例就少；介质中缺钾时植物体内的养分优先保证根系生长，以获取限制其生长的养分资源，同时增加了体内钾的再利用。低钾时，豫玉23吸钾能力大于兴农998，这与两品种的遗传特性及对低钾环境的适应性反应有关。

### 2.3 玉米各器官钙的积累量

由表3可以看出，第一次收获时，豫玉23各器官和整株的钙积累量显著高于兴农998。第二次收获时，与高钾处理相比，低钾处理豫玉23和兴农998

**表 2　不同钾水平下玉米各器官钾浓度和钾积累量**

**Table 2　K concentration and accumulation in different organs of maize at different harvest periods**

| 品种 Cultivar | 处理 Treat. | 钾浓度 K concentration(mg/g) | | | | 钾积累量 K accumulation(mg/plant) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 叶位 Leaf station | | | 根 Roots | 叶位 Leaf station | | | 根 Roots | 整株 Total |
| | | 上 Upper | 中 Middle | 下 Lower | | 上 Upper | 中 Middle | 下 Lower | | |
| 第一次收获 The first harvest | | | | | | | | | | |
| 豫玉 23 Yuyu23 | $K_{1.85}$ | 44.4 a | 34.5 a | 36.9 a | 15.0 a | 187.0 a | 85.2 a | 49.4 a | 32.7 a | 354.3 a |
| 兴农 998 Xingnong 998 | $K_{1.85}$ | 45.6 a | 35.0 a | 36.4 a | 18.4 a | 195.6 a | 87.5 a | 40.4 a | 35.4 a | 358.9 a |
| 第二次收获 The second harvest | | | | | | | | | | |
| 豫玉 23 Yuyu23 | $K_{1.85}$ | 40.3 ab | 33.1 a | 37.7 a | 18.6 a | 484.2 a | 93.1 a | 45.6 a | 61.3 a | 684.2 a |
| | $K_{0.1}$ | 32.5 c | 22.3 b | 19.4 b | 15.4 b | 348.8 b | 61.7 b | 23.7 b | 43.7 ab | 477.9 b |
| 兴农 998 Xingnong 998 | $K_{1.85}$ | 41.4 a | 32.7 a | 38.7 a | 19.6 a | 507.4 a | 88.5 a | 38.3 a | 52.2 a | 686.4 a |
| | $K_{0.1}$ | 38.2 b | 25.8 b | 20.3 b | 14.3 b | 322.0 b | 31.7 c | 17.3 b | 36.1 b | 407.1 b |

注(Note):同一时期同一列数值后不同小写字母表示在 5% 水平差异显著 Different letters within the same column and harvest period are significant at the 5% level.

**表 3　不同钾水平下两玉米品种各器官的钙积累量(mg/plant)**

**Table 3　Ca accumulation in the different organs of two maize cultivars under different K levels**

| 品种 Cultivar | 处理 Treatment | 上部叶 Upper leaves | 中部叶 Middle leaves | 下部叶 Lower leaves | 根 Roots | 整株 Total |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 第一次收获 The first harvest | | | | | | |
| 豫玉 23 Yuyu23 | $K_{1.85}$ | 9.12 a | 5.60 a | 5.17 a | 11.14 a | 31.03 a |
| 兴农 998 Xingnong 998 | $K_{1.85}$ | 7.17 b | 3.78 b | 3.28 b | 7.43 b | 21.66 b |
| 第二次收获 The second harvest | | | | | | |
| 豫玉 23 Yuyu23 | $K_{1.85}$ | 21.03 a | 7.23 a | 5.55 a | 14.28 a | 48.09 a |
| | $K_{0.1}$ | 18.16 a | 6.52 a | 5.80 a | 11.90 ab | 42.38 a |
| 兴农 998 Xingnong 998 | $K_{1.85}$ | 19.73 a | 5.81 ab | 3.64 b | 11.23 b | 40.41 a |
| | $K_{0.1}$ | 13.58 b | 3.91 b | 3.41 b | 8.92 c | 29.82 b |

注(Note):同一时期同一列数值后不同小写字母表示 5% 水平差异显著 Different letters within the same column and harvest period are significant at the 5% level.

的整株钙积累量分别降低 11.9% 和 26.2%,说明低钾抑制了两品种对钙的吸收,这可能与养分的不平衡供应有关(钙是为计算钾循环图测定的,本文不做详细分析)。

## 2.4　钾在玉米体内的吸收、运输和分配

通过 Jeschke 模型计算绘制的不同供钾水平下两玉米品种体内钾的循环模式见图 3。玉米在低钾处理 10 d 内,供高钾时,根对钾净吸收量、经木质部向地上部运输的钾及地上部钾的净积累量都明显大于低钾处理,说明供钾充足有利于玉米对钾的吸收和在各器官的积累。

高钾水平下,两品种上、中部叶和根均有钾的净积累,下部叶有钾输出,各器官积累的钾主要来自根系吸收,少部分来自源器官钾韧皮部输出。豫玉 23 和兴农 998 木质部中运输总钾量的 89.5% 和 88.7% 被运到各自上部叶,不到 10% 的钾被运到中部叶,只有极少量的钾通过木质部运到下部叶;两品种上部叶净积累钾的 91.2% 和 89.8% 来自木质部,其余通过韧皮部输入,韧皮部中运输的这部分钾全部来自中、下部叶韧皮部输出。

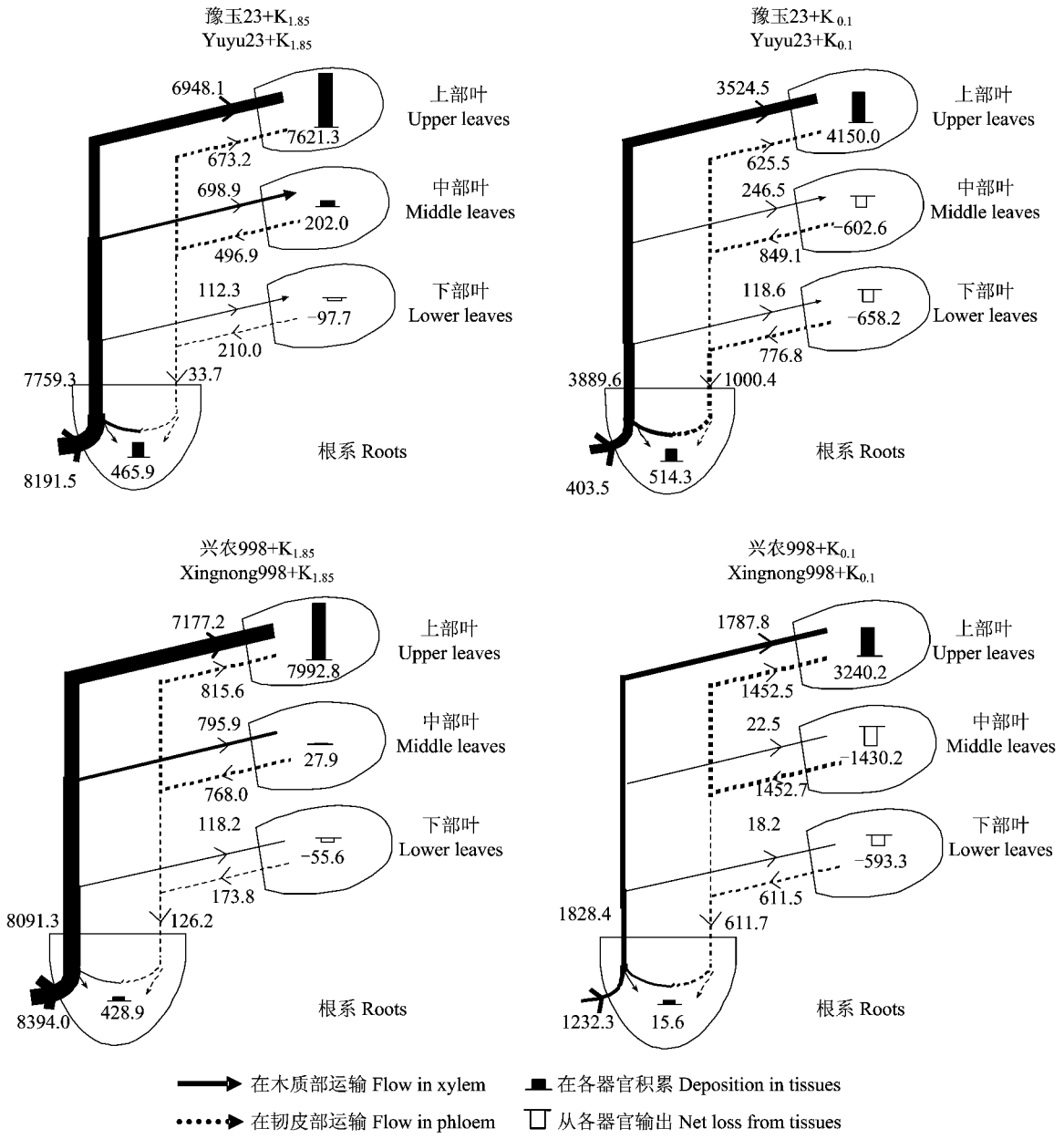


**图3 不同钾水平下两玉米品种钾的吸收、运输和利用**

**Fig. 3 Flow profiles for uptake, transport and utilization of K in two maize cultivars under different K levels**

[注(Note): 箭头宽度和垂直柱高度根据钾净运输量和净积累量作图,数字代表不同钾水平处理期间钾的净吸收、运输和利用量(μmol/plant) The width of arrows and the heights of histograms are drawn in proportion to the net flows and deposition of K. Numbers indicate the values of uptake, transport and utilization in μmoL K each organ per plant after 10 days under different K levels. ]

低钾水平下,只有上部叶和根成为钾库,中、下部叶均成为钾源。豫玉23和兴农998木质部中运输钾的25.7%和33.5%来自钾的韧皮部再循环,大部分仍靠根系吸收,但低钾处理根系吸收的钾是相应高钾处理的41.5%和14.7%。两品种上部叶积累钾的84.9%和55.2%是来自木质部运输,这一比例较高钾处理降低,中、下部叶输出的钾总和是各自高钾处理的2.2倍,说明低钾显著增加两玉米品种钾在韧皮部中的再循环。豫玉23和兴农998源器官流出钾的38.5%和70.3%通过韧皮部直接向上部新叶运输,剩余61.5%和29.7%经过韧皮部运至根中后再经过木质部运往地上部,参与钾的循环再利用。

## 2.5 不同基因型玉米的钾效率

从表4可以看出,第一次收获时,两玉米品种钾吸收效率和利用效率差异不显著。第二次收获时,

低钾处理的豫玉 23 和兴农 998 钾吸收效率是各自高钾处理的 37.5% 和 14.7%,两品种钾利用效率分别是高钾处理的 1.30 和 1.18 倍。两品种比较,供高钾时,豫玉 23 和兴农 998 钾吸收和利用效率差别不大,但在低钾胁迫时豫玉 23 的钾吸收效率和利用效率分别是兴农 998 的 2.57 和 1.15 倍。

**表 4　不同钾水平下各玉米品种的钾效率**

**Table 4　K efficiency of two maize cultivars under different K levels**

| 品种 Cultivar | 处理 Treatment | 钾吸收效率 K uptake efficiency [mg/(d·plant)] | 钾利用效率 K use efficiency (mg/mg) |
|---|---|---|---|
| 第一次收获 The first harvest | | | |
| 豫玉 23 Yuyu23 | $K_{1.85}$ | 8.86 a | 28.76 a |
| 兴农 998 Xingnong998 | $K_{1.85}$ | 8.97 a | 27.39 a |
| 第二次收获 The second harvest | | | |
| 豫玉 23 Yuyu23 | $K_{1.85}$ | 32.99 a | 28.26 c |
| | $K_{0.1}$ | 12.38 b | 36.76 a |
| 兴农 998 Xingnong998 | $K_{1.85}$ | 32.74 a | 27.15 c |
| | $K_{0.1}$ | 4.81 c | 32.03 b |

注(Note):同一时期同列数值后不同小写字母表示在 5% 水平差异显著 Different letters within the same column and harvest period are significant at the 5% level.

## 3　讨论

植物养分效率的高低主要取决于植物根系对养分的吸收效率和养分在植物体内的利用效率[14]。本试验结果表明,低钾处理 10 d 后,与高钾相比,低钾降低两玉米品种各器官和整株干重净增量(表 1)、钾浓度和钾积累量(表 2)、钾吸收效率(表 4)。高钾时两品种的干重和钾积累量差异不明显;而低钾时豫玉 23 各器官干重净增量和钾积累量均高于兴农 998,前者的钾浓度却低于后者,说明豫玉 23 能以较低的钾浓度制造较多的有机物质维持生长[15]。从钾吸收效率(表 4)看,低钾降低两品种钾吸收效率,且低钾处理的豫玉 23 钾吸收效率是兴农 998 的 2.57 倍,表明在低钾条件下豫玉 23 具有较强的吸收能力,这与其具有较大的根量和较强的根系吸收能力有关,即第二次收获时低钾的豫玉 23 根系干重是兴农 998 的 1.12 倍(表 1),低钾处理 10 d 期间,豫玉 23 根系净吸钾量是兴农 998 的 2.76 倍(表 2),而处理前两品种根系吸钾量无显著差别,这与低钾环境中前者能保持良好的根系形态,较活跃的根系活力等有关[16]。

低钾处理 10 d 期间,高、低钾处理的豫玉 23 和兴农 998 上部叶均为干物质和钾库,下部叶均为干物质和钾源,但干物质和钾在上、中、下部叶及根中的含量大小顺序不同(表 1 和表 2)。同时,高钾处理 10 d 期间的豫玉 23 和兴农 998 上部叶干重净增量分别是第 1 次收获的 1.86 和 1.85 倍;而低钾处理 10 d 期间高钾处理的两品种上部叶钾净增量均是第 1 次收获的 1.59 倍。低钾处理 10 d 期间,低钾处理的豫玉 23 和兴农 998 上部叶干重净增量分别是第 1 次收获的 1.55 和 0.96 倍;而低钾处理的两品种上部叶钾净增量分别是第 1 次收获的 0.87 和 0.67 倍。证明两品种体内干物质和钾向上部叶的运输是不同步的过程,这与磷和干物质的运输过程表现一致[10,17-18]。

钾是植物体内移动性很强的矿质元素之一,在植物体内不形成稳定的化合物,具有随生长中心转移而转移的特点[19]。与高钾处理相比,低钾降低钾净吸收量、经木质部向地上部运输量、以及上部叶钾的净积累量,促进两品种源器官(中、下部叶)钾的韧皮部再运输(图 3),提高钾利用效率(表 4),这与缺磷胁迫下小麦和玉米体内磷的运输规律基本一致[10,17]。有研究报道,缺钾影响木质部中的溶质流动,也会抑制 $NO_3^-$、磷酸盐、$Ca^{2+}$、$Mg^{2+}$ 和氨基酸的运输[20]。高钾水平下,两品种上、中部叶和根系均积累钾,下部叶输出钾;低钾时,只有上部叶和根系成为钾库,中、下部叶均成为源器官输出钾供应上部叶及根系。两个钾水平下玉米木质部中运输的

钾主要来自根系吸收,豫玉23和兴农998木质部运输钾的25.7%和33.5%来自钾的韧皮部再运输,而高钾时两品种韧皮部中再运输钾占木质部运输总量的不到2%;高钾时两品种上部叶净增加的钾分别有8.8%和10.2%是通过韧皮部运进,低钾时这一比例分别为15.1%和44.8%,说明低钾促进源器官钾从韧皮部输出向上部新生叶运输。Engle和Marschner[20]指出矿质元素由地上部向根再转移的过程反馈调节了根系对矿质元素的吸收速率。韧皮部中钾的浓度随植物营养状况的变化而变化,当地上部钾浓度降低时,钾向根部再转移数量也相应降低,这就形成了一个增加该养分吸收的信号。这种信号可能与内源激素的控制和体内基因的表达有关[21]。关于调控方面的研究有待进一步深入。

## 参考文献:


[1] 高祥照,马文奇,崔勇,等. 我国耕地土壤养分变化与肥料投入状况[J]. 植物营养与肥料学报,2000,6(4):363-369.
Gao X Z, Ma W Q, Cui Y *et al.* Changes of soil nutrient contents and input of nutrients in arable of China[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2000, 6(4):363-369.

[2] 谢建昌,周健民. 我国土壤钾素研究和钾肥使用的进展[J]. 土壤,1999,(5):244-254.
Xie J C, Zhou J M. Research progress on K element in soil and K fertilizer utilization[J]. Soil, 1999, (5):244-254.

[3] 黄绍文,金继运. 土壤钾形态及其植物有效性研究进展[J]. 土壤肥料,1995,(5):23-29.
Huang S W, Jin J Y. Research progress on K form in soil and plant availability[J]. Soil Fert., 1995, (5):23-29.

[4] Jeschke W D, Pate J S. Temporal patterns of uptake, flow and utilization of nitrate, reduced nitrogen and carbon in a leaf of salt-treated castor bean[J]. J. Exp. Bot,, 1992, 43 (3):393-402.

[5] Jeschke W D, Kirekby E A, Peuke A D *et al.* Effects of P deficiency on assimilation and transport of nitrate and phosphate in intact plants of castor bean (*Ricinus communis* L.)[J]. J. Exp. Bot., 1997, 48 (306):75-91.

[6] Armstrong M, Kirkby E A. Estimation of potassium recirculation in tomato plants by comparison of the rates of potassium and calcium accumulation in the tops with their fluxes in the xylem stream[J]. Plant Physiol., 1979, 63:1143-1148.

[7] Siebrecht S, Tischner R. Changes in the xylem exudates composition of poplar dependent on the nitrogen and potassium supply[J]. J. Exp. Bot., 1999, 50:1979-1806.

[8] Jiang F, Li C J, Jeschke W D *et al.* Effect of top excision and replacement by 1-naphthylacetic acid on partition and flow of potassium in tobacco plants[J]. J. Exp. Bot., 2001, 52(364):2143-2150.

[9] 王西志,王斌,李迎春,等. 不同钾营养效率玉米品种的筛选[J]. 中国土壤与肥料,2012,(1):64-68,88.
Wang X Z, Wang B, Li Y C *et al.* Screening of maize varieties with different potassium nutrient efficiencies[J]. Soil Fert. Sci. China, 2012, (1):64-68, 88.

[10] Peng Z P, Li C J. Transport and partitioning of phosphorus in wheat as affected by P withdrawal during flag leaf expansion[J]. Plant Soil, 2005, 268 (1):1-11.

[11] Hibberd J M, Quick W P, Press M C *et al.* Solution fluxes from tobacco to the parasitic angiosperm Orobanche cernua and the influence of infection on host carbon and nitrogen relations[J]. Plant, Cell Environ., 1999, 22:937-947.

[12] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京:中国农业出版社,2005. 270-274.
Bao S D. Soil and agro-chemistry analysis (3rd Ed)[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2005. 270-274.

[13] Morris R A, Garrily D P. Resource capture and utilization in intercropping: Non-nitrogen nutrients[J]. Field Crop Res., 1993, 34:319-333.

[14] Kamh M, Wiesler F, Ulas A *et al.* Root growth and N uptake activity of oilseed rape (*Brassica napus* L.) cultivars differing in nitrogen efficiency[J]. J. Plant Nutr. Soil Sci., 2005, 168:130-137.

[15] 姜存仓,王运华,鲁剑巍,等. 不同棉花品种苗期钾效率差异的初步探讨[J]. 棉花学报,2004,16(3):162-165.
Jiang C C, Wang Y H, Lu J W *et al.* Potassium efficiency of different cotton varieties at seedling stage[J]. Cotton Sci., 2004, 16(3):162-165.

[16] 王朝东,李迎春,王西志,等. 不同基因型玉米适应低钾胁迫的根系响应机理[J]. 河北农业大学学报,2012,35(6):1-7.
Wang Z D, Li Y C, Wang X Z *et al.* Response mechanism of the absorption of potassium in roots of different maize cultivars[J]. J. Hebei Agric. Univ., 2012, 35(6):1-7.

[17] 袁硕,彭正萍,沙晓晴,王艳群. 玉米杂交种对缺磷反应的生理机制及基因型差异[J]. 中国农业科学,2010,43(1):51-58.
Yuan S, Peng Z P, Sha X Q, Wang Y Q. Physiological mechanism of maize hybrids in response to P deficiency and differences among cultivars[J]. Sci. Agric. Sin., 2010, 43 (1):51-58.

[18] Rodríguez D, Goudriaan J. Effects of phosphorus and drought stresses on dry matter and phosphorus allocation in wheat[J]. J. Plant Nutr., 1995, 18:2501-2517

[19] 郭丽琢,胡恒觉. 植物体内钾循环与再循环的研究进展[J]. 甘肃农业大学学报,2001,36(1):1-7.
Guo L Z, Hu H J. Progress in the research of cycling and recycling of potassium within plants[J]. J. Gansu Agric. Univ., 2001, 36(1):1-7.

[20] Engle C, Marschner H. Adaption of potassium translocation into the shoot of maize (*Zea mays*) to shoot demand: Evidence for xylem loading as a regulating step[J]. Physiol. Plant., 1992, (86):263-268.

[21] Shen F K, Wei Z, Wang L *et al.* Effects of plant growth regulator on absorption, circulation and contents of potassium in flue-cured tobacco[J]. Agric. Sci. Tech., 2011, 12 (12):1877-1880, 1982.